


SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU

VICE TERZIĆ

MOGUĆNOST IMPLEMENTACIJE
3D TISKANJA PRIČUVNIH DIJELOVA
NA BRODU

DIPLOMSKI RAD

SPLIT, 2019.

	POMORSKI FAKULTET U SPLITU	STRANICA: ŠIFRA:	1/1 F05.1.-DZ
	DIPLOMSKI ZADATAK	DATUM:	12.7.2019.

SPLIT, 12.7.2019.

ZAVOD/STUDIJ: POMORSKE ELEKTROTEHNIČKE I INFORMATIČKE TEHNOLOGIJE

PREDMET: NOVE TEHNOLOGIJE U DIJAGNOSTICI I UPRAVLJANJU

DIPLOMSKI ZADATAK

STUDENT: VICE TERZIĆ

MATIČNI BROJ: 0023089021

ZAVOD/STUDIJ: POMORSKE ELEKTROTEHNIČKE I INFORMATIČKE TEHNOLOGIJE

ZADATAK:

ISPITATI MOGUĆNOST UPOTREBE TEHNOLOGIJE 3D TISKA ZA IZRADU PRIČUVNIH DIJELOVA NA BRODOVIMA.

OPIS ZADATKA:

RAZVOJ TEHNOLOGIJE ADITIVNE PROIZVODNJE, KOJA JE SUPROTNA CNC TEHNOLOGIJI, OTVARA MNOGA PODRUČJA U PRIMJENI, OSOBITO POVEZANA S INTERNET TEHNOLOGIJOM, ALI I S POSTUPCIMA NABAVE, PLANOVIMA NABAVE I MANIPULIRANJEM PRIČUVNIM DIJELOVIMA. POTREBNO JE OPISATI TEHNOLOGIJE 3D TISKANJA I RAZMOTRITI MOGUĆNOSTI PRIMJENE U POMORSTVU, A OSOBITO NA BRODOVIMA.

CILJ:

UZ ANALIZU MOGUĆNOSTI PRIMJENE 3D TISKA ZA PRIČUVNE DIJELOVE, POTREBNO JE, KAO PRAKTIČNI DIO, IZRADITI MODELE RAZNIH DIJELOVA TE ISPRINTATI NA 3D PRINTERU NEKE OD NJIH.

ZADATAK URUČEN STUDENTU: _____

POTPIS STUDENTA: _____

MENTOR: IGOR VUJOVIĆ

SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU

STUDIJ: POMORSKE ELEKTROTEHNIČKE I INFORMATIČKE
TEHNOLOGIJE

MOGUĆNOST IMPLEMENTACIJE
3D TISKANJA PRIČUVNIH DIJELOVA
NA BRODU

DIPLOMSKI RAD

MENTOR:

Izv. prof. dr. sc. Igor Vujović

STUDENT:

Vice Terzić (MB:0023089021)

SPLIT, 2019.

SAŽETAK

Tehnologija 3D tiska je budućnost i prožima se u svim segmentima industrije. Brodarska industrija prati sve vodeće svjetske trendove u tehnologiji, pa tako i tehnologiju 3D tiska. Pričuvni su dijelovi neophodni u održivosti broda kao sustava i zauzimaju velik dio industrije, a prate i trendove novih materijala, skladištenja, izrade i dostave. Implementiranjem 3D tehnologije u industriju pričuvnih dijelova brodskog sustava cilj je skratiti vrijeme popravka brodskih sustava, za vrijeme dostave do broda, te smanjiti troškove skladištenja izradom dijelova po zahtjevu. Kao trenutno rješenje aditivne tehnologije, svojom jednostavnošću upotrebe i cijenom implementacije otkriva se tehnologija taložnog očvršćivanja. Praktični dio rada uključuje izradu jednostavnih modela tom tehnologijom.

Ključne riječi: *3D tisak, pričuvni dijelovi, taložno očvršćivanje, brod*

ABSTRACT

3D printing technology presents the future and it expands all the segments of the industry. The shipping industry follows the entire world's leading trends in technology, including 3D printing technology. The spare parts are essential to the ship's sustainability as a system and occupy a large part of the industry, following the trends of new materials, warehousing, fabrication and delivery. By implementing 3D technology in the ship's spare parts industry, the aim is to shorten the time of ship system repairs by shortening delivery time to the ship, as well as reducing storage costs by producing parts on demand. This study has found fused deposition modeling technology to be a current solution to additive technology through using simple and inexpensive implementation. The practical part of the work is to make a few simple models with this technology.

Keywords: *3D print, spare parts, fused deposition modeling, ship*

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. 3D TISAK	2
2.1. NAČELO RADA 3D TISKA	2
2.2. KRATKA POVIJEST 3D TISKA	3
2.3. PREDNOSTI I MANE 3D TISKA	4
2.4. TKO KORISTI 3D TISAK	6
2.5. CNC TEHNOLOGIJA NASPRAM 3D TEHNOLOGIJI	11
2.5.1. Odabir prave tehnologije	12
2.5.2. Mjera točnosti	13
2.5.3. Složenost modela	14
2.6. TEHNOLOGIJE 3D TISKA	16
2.6.1. Taložno očvršćivanje	16
2.6.2. Stereolitografija i digitalno mapiranje svjetla u izradu 3D objekta	17
2.6.3. Selektivno lasersko srašćivanje	18
2.6.4. Mlaznica materijala	19
2.6.5. Tehnologija povezivanja	20
2.6.6. Selektivno taljenje i elektronsko taljenje metala u 3D tehnologiji	21
2.7. IDEALNI 3D PISAČ	23
3. PRIČUVNI DIJELOVI	25
3.1. PRISTUPI ODRŽAVANJA BRODA	25
3.2. BUDUĆNOST PRIČUVNIH DIJELOVA	27
3.2.1. Utjecaj na tržište pričuvnih dijelova	27
3.3. PLAN IMPLEMENTACIJE 3D TEHNOLOGIJE TISKA	33
3.4. PRIMJENA U POMORSKOJ INDUSTRIJI	34
3.4.1. 3D <i>Hubs</i> platforma	37
3.5. UTJECAJ TISKANJA PRIČUVNIH DIJELOVA NA DOSTUPNOST BRODSKIH SUSTAVA	38
3.5.1. Primjer simulacije	41
4. TEHNOLOGIJA TALOŽNOG OČVRŠĆIVANJA	43
4.1. ODABIR PROCESA IZRADE PREMA MATERIJALU	43
4.2. MODELIRANJE TALOŽNIM OČVRŠĆIVANJEM	44

4.2.1.	Načelo rada FDM pisača.....	44
4.2.2.	Karakteristike FDM pisača	45
4.2.3.	Problem savijanja	46
4.2.4.	Problem prijanjanja.....	46
4.2.5.	Struktura potpore	47
4.2.6.	Spajanje i šupljine.....	48
4.2.7.	Zajednički FDM materijali	49
5.	REZULTATI: 3D MODEL	52
5.1.	PROJEKTIRANJE MODELA FDM TEHNOLOGIJE TISKA	53
5.2.	IZRADA MODELA.....	54
5.2.1.	Ultimaker Cura 3.5.1	56
5.2.2.	Original Prusa i3 MK2 FDM 3D pisač.....	58
5.2.3.	Troškovnik	60
5.2.4.	Model cilindra brave električnog ormarića	63
5.2.5.	Model univerzalnog ključa električnog ormarića	66
5.2.6.	Model zupčanika	69
6.	ZAKLJUČAK	70
	LITERATURA	72
	POPIS ILUSTRACIJA	73
	POPIS TABLICA.....	75
	POPIS KRATICA	76

1. UVOD

Ideja 3D tiskanja otvara mnoge mogućnosti u industriji i ne postoje granice kreativnosti u izradi modela. Kreativnost je karakteristika današnjih znanstvenika i izumitelja te se ovom aditivnom tehnologijom izrade predmeta preskaču mnoge prepreke, prvenstveno one financijske koje su onemogućavale stvaranje nekih inovativnih rješenja. Kod broderske industrije nailazi se na problem odsutnosti od svijeta, što zahtijeva promišljanje o novim rješenjima na brodu kako bi on postao potpuno autonomno okruženje koje može funkcionirati bez doticaja s kopnenim svijetom. Jedan od tih problema jesu učestali kvarovi i potrebni servisi koji zahtijevaju posebno skladištenje potrošnih i pričuvnih dijelova kako bi brod kao sustav mogao opstati. Implementiranjem 3D tehnologije pokušao bi se riješiti i taj problem, na način da se dijelovi spremaju u bazu podataka u digitalnom obliku kao modeli spremni za tiskanje. 3D tehnologija predstavlja širok pojam koji je u stalnom razvoju.

U prvom dijelu rada opisana je aditivna tehnologija i način rada, gdje se danas koristi 3D tehnologija, koje su njene prednosti i mane, kao i problem izbora materijala. Istraživanjem više vrsta aditivne tehnologije cilj je bio pronaći idealnu tehnologiju koja bi se mogla trenutno implementirati na brodu kao sustavu koji nije u mirovanju. Poučeni primjerom 3D tiskanja u svemiru i samom cijenom implementiranja tehnologije, FDM tehnologija taložnog očvršćivanja čini se kao najbolje rješenje.

Pričuvni dijelovi neophodni su za održivost sustava pa tako i broda kao sustava. Iz tog se razloga u drugom dijelu rada obraća pažnja na održavanje broda. Analizom i istraživanjem tržišta održivosti sustava, budućnost pričuvnih dijelova razvija se u smjeru implementiranja 3D tehnologije tiska u tržište pričuvnih dijelova. Tijekom pisanja ovog rada budućnost je već zastarjela, tehnologija se razvija eksponencijalno, nezaustavno i nemoguće je popratiti svaki segment razvoja tehnologije i inovacija.

Kao odabrana aditivna tehnologija 3D tiskanja pričuvnih dijelova na brodu, FDM tehnologija ima svoje prednosti i mane. Daljnjim istraživanjem otkrivaju se problemi pri dizajniranju modela i poteškoće na koje se može naići razvojem ove tehnologije. Problemi skladištenja materijala FDM aditivne tehnologije i jednostavnost korištenja takve tehnologije opisani su u trećem dijelu ovog rada što predstavlja i njegovu cjelokupnu bit.

Dizajniranjem i tiskanjem raznih modela istraženi su problemi pri praktičnom dijelu ovog rada, uz opis načina izrade te obrazloženje istih.

2. 3D TISAK

3D tisak aditivni je postupak proizvodnje čime se dobiva fizički objekt odabranog materijala iz prethodno digitalno projektiranog objekta. Poznati su različiti oblici 3D tiska kao i različiti materijali kojima se koristi pri izradi, gdje se sa svim materijalima pristupa s istim postupkom obrade: digitalni model pretvara se u čvrsti trodimenzionalni objekt dodavanjem materijala sloj po sloj.[9]

2.1. NAČELO RADA 3D TISKA

Svaki 3D tisak započinje digitalnim modelom u obliku datoteke pogodne za čitanje programima za modeliranje i 3D tiskanje i služi kao predložak za fizički objekt. Pokušati tiskati objekt bez prethodno izrađenog nacrtu usporedivo je s tiskanjem dokumenta bez prethodno napisanog teksta datoteke. Projektirani model izrezan je na tanke slojeve te kao takav poslan 3D pisaču na izradu navedenog.[10]

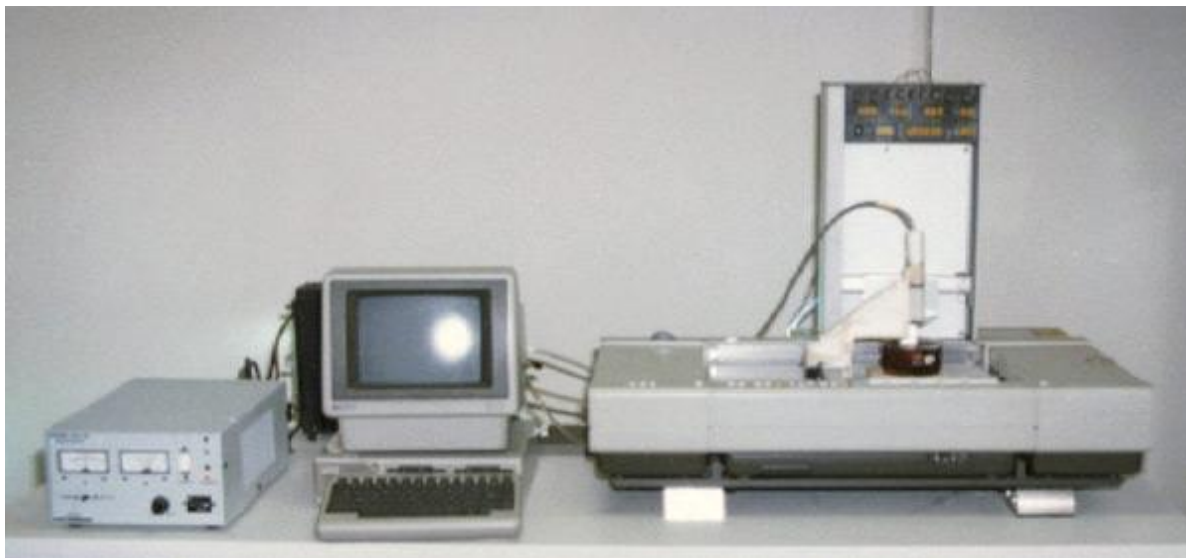


Slika 1. Prijenos digitalnog modela s računala na 3D pisac

Od ovog dijela izrade, u daljnjem procesu 3D tiska, različiti su oblici tehnologija, počevši od osobnih stolnih pisaa koji rastapaju plastični materijal te ga polažu na podlogu za tisak, do industrijskih strojeva koji pomoću lasera selektivno rastapaju točno određene dijelove metalnog praha pri velikim temperaturama. Tisak je relativno spor i zahtijeva nekoliko sati, ovisno o veličini i objekta, te se uz sami tisak treba računati i vrijeme završne obrade kako bi se željeni objekt doveo do gotovog, uporabljivog objekta.[10]

2.2. KRATKA POVIJEST 3D TISKA

Iako se 3D tisak smatra novom, odnosno tehnologijom budućnosti, tehnologija 3D tiska se koristi već trideset i više godina.

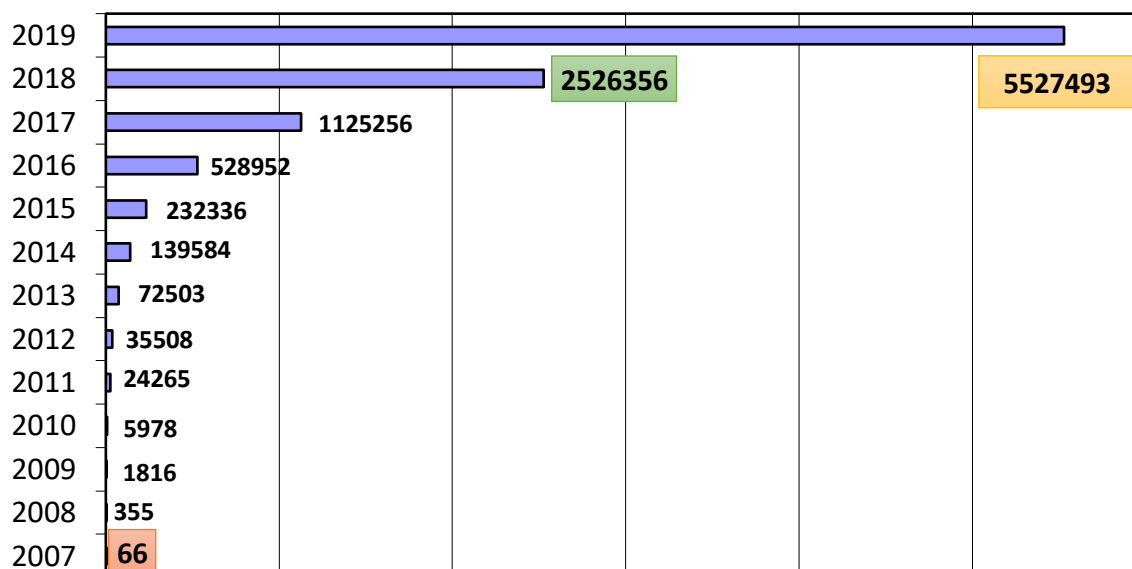


Slika 2. Prvi 3D pisac (izumio Chuck Hull 1983. godine) [11]

Chuck Hull izumio je prvi 3D pisac u obliku procesa pod nazivom „stereolitografija“ 1983. godine. U patentu je definirao stereolitografiju kao metodu i aparat za izradu čvrstih predmeta uzastopnim ispisivanjem tankih slojeva skrućenog materijala, jedan iznad drugog. Ovaj se patent usredotočuje samo na „tiskanje“ s laganom skrućenom tekućinom, ali nakon što je Hull osnovao tvrtku „3D Systems“, ubrzo je shvatio da njegova tehnika nije ograničena samo na tekućine, proširujući definiciju na „bilo koji materijal sa sposobnošću skrućivanja ili mijenjanja fizičkog stanja“. Time je izgradio temelje onoga što je danas poznato kao aditivna proizvodnja ili 3D tisak.[9]

U sadašnjosti se postavlja pitanje zašto je baš sada došlo do povećanja korištenja 3D tehnologije. Do 2009. godine 3D tiskanje bilo je limitirano samo na industrijsku proizvodnju i upotrebu, ali je istekao patent za modeliranje taložnog modela (engl. *Fused Deposition modeling* - FDM) - jedne od najčešćih tehnologija 3D ispisa.

Kroz projekt misije *RepRap* za izgradnju stroja za samoumnožavanje „rođen“ je prvi desktop 3D pisac. Budući da je slijedilo sve više i više proizvođača, ono što je jednom koštalo 200.000 dolara iznenada je postalo dostupno za manje od 2000 dolara pa je u današnje vrijeme tržište 3D printera otvoreno za svakodnevnu kućnu upotrebu te, od 2009. godine, dostupno za srednje i manje potrošače, što se jasno vidi iz Slike 3.[4]



Slika 3. Broj prodanih 3D pisača od 2007. godine do 2019. godine[4]

Rast prodaje 3D pisača je nezaustavljiv, vidljivo sa slike 3. Kako patentni za aditivnu proizvodnju istječu, više se inovacija očekuje u godinama koje dolaze. Danas ima oko 300.000 potrošačkih 3D pisača na svijetu, a ta se brojka svake godine udvostručuje.[9]

2.3. PREDNOSTI I MANE 3D TISKA

Vrlo je važno shvatiti da je 3D tisak tehnologija ubrzano razvijena tehnologija koja dolazi sa svojim skupom inherentnih prednosti, ali i nedostacima u nekim aspektima, u odnosu na tradicionalne proizvodne procese. Primjerima se najbolje može stvoriti objektivna slika koja daje odgovore u kojem se smjeru tehnologija 3D tiska kreće u bliskoj budućnosti.[10]

3D tisak omogućuje dizajnerima stvaranje složenih oblika i dijelova - od kojih mnoge ne mogu proizvesti konvencionalne metode proizvodnje. Po prirodnim zakonima fizike, proizvodnja metodama aditiva znači da složenost nema cijenu; razrađen dizajn proizvoda s kompliciranim značajkama dizajna sada košta isto koliko bi koštao i da proizvodi jednostavne dizajne proizvoda koji prate sva tradicionalna pravila konvencionalne proizvodnje.[5]

Uz tradicionalne metode proizvodnje, jednostavno je i jeftinije proizvoditi i prodavati proizvode po pristupačnoj cijeni potrošaču. Alternativno, 3D ispis omogućuje jednostavnu prilagodbu; samo treba promijeniti nacrt digitalno kako bi se mijenjale bez dodatnih alata ili drugih skupih proizvodnih procesa potrebnih za proizvodnju konačnog proizvoda. Rezultat

toga je da se svaka stavka može prilagoditi kako bi zadovoljila specifične potrebe korisnika bez dodatnih troškova proizvodnje.[5]

Kod metalnog lijevanja ili injekcijskog prešanja svaki dio svakog proizvoda zahtijeva novi kalup - faktor koji može vrlo brzo proizvesti troškove. Kako bi nadoknadili ove troškove proizvodnje, većina se tvrtki oslanja na masovnu proizvodnju objekta. Alternativno, budući da je 3D ispis proces „jednog alata“, nema potrebe za promjenom bilo kojeg aspekta procesa, a nema potrebe niti za dodatnim troškovima ili vremenom dovršavanja između stvaranja kompleksnog objekta ili onog jednostavnog. U konačnici, to dovodi do bitno nižih fiksnih troškova.[5]

Budući da nema skupih alata potrebnih za stvaranje objekata putem 3D tiska, dolazi se do zaključka kako je to izrazito ekonomična metoda za dizajnere ili poduzetnike koji žele vršiti testiranje na tržištu ili ga upotrijebiti kod male proizvodnje. Za primjer se može uzeti pokretanje vlastite proizvodnje putem web oglašivača kao što je *Kickstarter*. 3D tisak nudi rutu na tržištu koja je puno manje rizična za one koji se bave implementacijom ideje.[9]

Mnogi konvencionalni proizvodni procesi izlučuju i mnogo neiskorištenog materijala: počinje se s sirovinom koju se izreže, strojno obrađuje, dok se ne dovede u željeni oblik. Za mnoge proizvode - poput nosača za zrakoplov - normalno je izgubiti 90% sirovine tijekom opisanog procesa.

Alternativno, 3D tisak je proces nadograđivanja: stvaranje objekta iz sloja sirovine sloj po sloj. Naravno, kada je objekt proizveden na taj način, koristi se samo onoliko materijala koliko je potrebno za stvaranje tog određenog objekta. Osim toga, većina tih materijala može se reciklirati do novog 3D tiskanog predmeta.[9]

Unatoč svim prednostima proizvodnje putem aditivnih metoda, 3D tisak još nije konkurentan konvencionalnim proizvodnim procesima kada je u pitanju masovna proizvodnja. U većini slučajeva iskoristivost varira između 1000 i 10.000 jedinica, ovisno o materijalu i dizajnu. Kako se cijena pisača i sirovina nastavlja smanjivati, očekuje se daljnji porast iskoristivosti proizvodnje pomoću 3D pisača.[9]

Unatoč tome što je danas dostupno više od šest stotina 3D tiskarskih materijala - od kojih su većina plastike i metali - izbor je još uvijek ograničen u usporedbi s konvencionalnim materijalima, bojama. Međutim, i tu se očekuje napredak što potvrđuje trenutno korištenje novih materijala kao što su drvo, metali, keramika, pa čak i čokolada.[9]

U nekim tehnologijama 3D ispisa, sila se na određene dijelove ne raspoređuje jednako zbog postupka izrade sloj po sloj. Kao takvi, dijelovi koji su tiskani u 3D-u često su slabiji od onih izrađenih konvencionalnim metodama. Također, potrebno je poboljšanje

svojstva ponovljivosti: dijelovi izrađeni na različitim strojevima mogu imati različita svojstva. Međutim, kako se tehnička poboljšanja nastavljaju na novim kontinuiranim 3D procesima tiskanja kao što je *Carbon3D*, ta će ograničenja vjerojatno nestati u bliskoj budućnosti.[9]

Iako zasad 3D predmeti nemaju preciznost kao konvencionalno izrađeni objekti, 3D tisak trenutno ima mogućnost preciznosti tiskanja od oko 20 do 100 mikrona (visine oko jednog lista papira). Za korisnike koji stvaraju predmete s malim tolerancijama i detaljima dizajna, 3D tisak nudi izvrstan način stvaranja proizvoda. Za predmete koji zahtijevaju više radnih dijelova i sitnije detalje, teško je konkurirati visokoj preciznosti pojedinih proizvodnih procesa.[9]

Tablica 1. Prednosti i nedostaci 3D tiska

PREDNOSTI	NEDOSTACI
Nema granice projekta modela	Veća cijena za veliku proizvodnju
Prilagođeni model točno za što je potrebno	Ograničena izdržljivost i dugotrajnost
Nisu potrebni dodatni alati i kalupi, niska cijena popravka specifičnih dijelova	Manje izbora materijala boja i završnih obrada
Brza izrada prototipova i jednostavnija dostava krajnjem korisniku	Manja preciznost - uz preciznu izradu raste vrijeme izrade
Manje otpada, bolja iskoristivost materijala	Zahtjev za kvalitetnim modelom

2.4. TKO KORISTI 3D TISAK

Jedna od najvećih prednosti 3D tiska jest ta da može biti koristan za svakoga, bez obzira na industriju ili struku. U daljnjem će tekstu kroz primjere biti obrazloženo kako korisnici koriste 3D tisak i zašto su odabrali 3D tehnologiju kao svoj preferirani prototip proizvodne metode za specifične slučajeve upotrebe.[5]

3D ispis nije ništa novo u automobilskoj industriji kada se radi o prototipovima, kao i gotovim dijelovima. Među ostalima, mnogi timovi *Formule 1* koriste 3D tisak za testiranje i, u konačnici, stvaranje prilagođenih dijelova automobila koji se koriste u natjecateljskim utrkama. Slično tome, švedski proizvođač automobila *Koenigsegg* koristi 3D ispis za proizvodnju varijabilnog turbopunjača za svoj *One 1* model - automobil koji ima

nevjerojatan omjer snage i težine. Metalni dio nije samo izuzetno lagan, već može izdržati i silnu snagu sagorijevanja goriva i zahtjevnih uvjeta trkaće staze.[5]

Većina je današnjih slušnih pomagala 3D tiskana. Polje medicine i protetike uglavnom je imalo koristi od usvajanja 3D tiska. Prilagođeni oblici kao što su slušna pomagala više ne zahtijevaju ručni rad, s trodimenzionalnim ispisom moguće je napraviti prilagođeni dizajn klikom gumba. To znači znatno niže troškove i manje vrijeme proizvodnje. [10]



Slika 4. 3D tisak modela slušnog aparata[10]

Slično kao i slušna pomagala, protetika i druge pomoćne medicinske naprave, proteze i slično prilagođeni su posebno za potrebe svog krajnjeg korisnika. Do sada je nastajao problem zbog vremena, a time i novca, uloženog za ručnu izradu svakog proizvoda. Uvođenjem 3D tiska u oralnu medicinu i protetiku, takvo je što sada problem prošlosti. Danas, zubni kirurg ili ortodont može 3D skenirati čeljust i zube te digitalno konstruirati i proizvoditi jedinstvene kopče prilagođene za krajnjeg korisnika. Dentalna je industrija u potpunosti prihvatila 3D tisak, a postoje čak i modeli 3D pisača dizajnirani posebno za proizvodnju zubnih pomagala i kalupa za izradu zubnih pomagala. [10]

Možda jedan od najvažnijih primjera kako 3D tisak mijenja živote mnogih na bolje dolazi u obliku e-NABLE proteze ruke. Besplatni model i jednostavna 3D tiskana proteza ruke konstruirana je tako da se lako izrađuje za djecu koja ju trebaju. Među ostalim razlozima zašto je e-NABLE projekt revolucionaran ističe se i onaj da djeca rastu, oni također prerastu svoje proteze. Kada se proizvode uobičajenim proizvodnim metodama, ti uređaji mogu koštati desetke tisuća dolara. S 3D tiskom, djeca, uz globalnu zajednicu inženjera i dizajnera

koji su velikodušno darovali svoje vrijeme i resurse, mogu kreirati vlastite protetske uređaje i proizvoditi ih po vrlo povoljnim cijenama. [10]



Slika 5. 3D tisak ruke prilagođene krajnjem korisniku (e-NABLE) [10]

GE Aviation i Safran razvili su metodu za 3D mlaznice s ispušnim gorivom za mlazne motore. Tehnologija omogućuje inženjerima zamjenu složenih sklopova s jednim dijelom koji je lakši od prethodnih rješenja, lakši je i povećava učinkovitost goriva za mlazni motor do 15%. GEovi novi LEAP motori utjelovljuju 19 mlaznica za ispis s 3D tehnologijom, što će koristiti avioni poput Boeinga 737MAX i Airbusa A320neo. [10]

Tvrtka *SpaceX* i njezin vlasnik Elon Musk, koristila je 3D tisak za izradu komora motora za svoj *SuperDraco* motor; motor koji je instaliran na „Dragonovoj“ letjelici. Ova odluka drastično je smanjila vrijeme izrade: od koncepta do crteža te prve upotrebe dolazi se unutar samo tri mjeseca. Komore motora tiskane su pomoću Inconela, super legure visokih performansi, i uspješno se testiralo desetke puta. [10]



Slika 6. Komora motora tiskana 3D tehnologijom [10]

Kao mala tvrtka koja stvara modularnu zidnu umjetnost, *Mak Roba* je trebala rješenje za stvaranje visokokvalitetnog prototipa za novi koncept proizvoda. Pomoću selektivne laserske sinteze (engl. *Selective Laser Sintering* - SLS), tvrtka je uspjela, uz pomoć ove 3D tehnologije ispisivati kratku proizvodnu liniju od 4.000 komada koji su korišteni za dobivanje vrijednih povratnih informacija od njihove korisničke test grupe. U ovoj fazi bilo je lako napraviti preciziranje dizajna i riješiti probleme prije nego što se obvezuju na više formalnih i skupih konvencionalnih proizvodnih naloga. [10]

Prije uvođenja 3D tiska u arhitekturu, stvaranje modela bio je iznimno naporan i dugotrajan proces od vitalne važnosti za komunikaciju arhitekata s klijentom u namjeri izrade dizajna. Danas, i velika poduzeća i nezavisni arhitekti mogu brzo i jednostavno izrađivati model 3D koncepta, izravno s postojećih CAD podataka koji se koriste za izradu nacрта. Ovisno o željenoj razini komunikacije, ti trodimenzionalni modeli mogu se tiskati u više različitih materijala i realističnih boja. [10]



Slika 7. Model arhitektonskog dizajna – izravni tisak sa CAD projekta[10]

3D tisak nudi studentima iz više područja studija pristupačno rješenje kako bi njihovi koncepti mogli biti opipljivi u ranim fazama dizajna. Kroz interaktivni rad s prototipovima, učenici mogu brzo naučiti od modela, usavršavati ih i stjecati praktično iskustvo u razvoju idealnog rješenja za dizajn. Ovaj projekt bicikla napravili su studenti industrijskog inženjerstva na Tehničkom fakultetu Sveučilišta Fontys koji su svoj digitalni nacrt preobrazili u 3D model tiska. [10]



Slika 8. Projekt bicikla izrađen pomoću 3D tiska[10]

Pilot projekti, dakle, pronalaze idealno rješenje za predstavljanje modela. Mogućnosti su beskonačne, a pritom postoji sloboda izražavanja i dijeljenja ideja relativno jeftino i vrlo pristupačno. Ipak, sile se na ovakav model ne mogu primijeniti kao ni testiranja sile na željene točke modela u svrhu testiranja stvarnog modela.

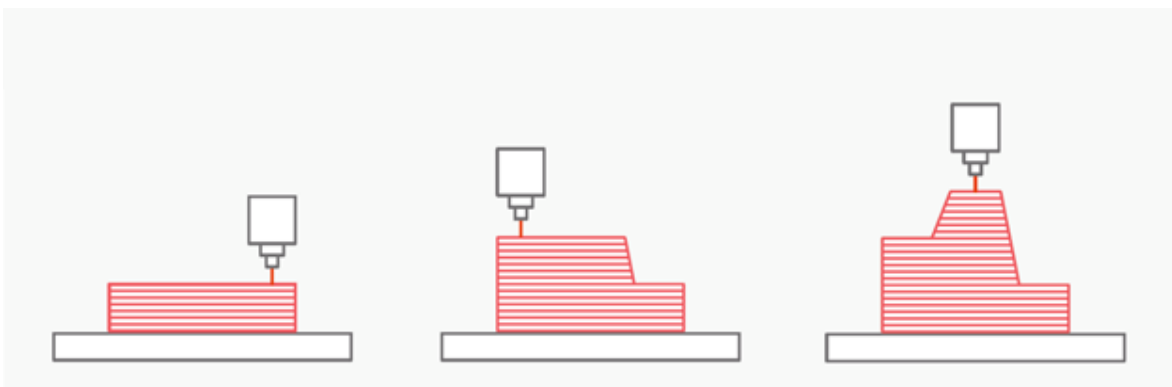
2.5. CNC TEHNOLOGIJA NASPRAM 3D TEHNOLOGIJI

CNC (engl. *Computer Numerical Control*) obrada je tehnologija izdvajanja materijala (engl. *Subtractive Manufacturing*). Za razliku od 3D tiska, proces obično započinje čvrstim blokom materijala, nakon čega se taj blok uklanja kako bi se postigao željeni oblik, koristeći razne oštre rotirajuće alate i rezače. Jedna je od najpopularnijih metoda proizvodnje za male jednokratne poslove i za srednju do visoku proizvodnju. Nudi izvrsnu ponovljivost, visoku točnost i širok raspon materijala i površinskih obrada.[1]



Slika 9. Tehnologija izdvajanja[1]

Suprotno CNC tehnologiji jest aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing* - AM) ili 3D ispisni proces, gdje se model izrađuje dodavanjem materijala po jedan sloj odjednom. AM procesi ne zahtijevaju posebne alate ili uređaje, tako da su početni troškovi postavljanja svedeni na minimum. Postupci 3D tiska koji su najsličniji CNC tehnologiji su SLS ili FDM za plastiku i SLM / DMLS ili BJ za metale, te su prikladni za usporedbu ovih dviju tehnologija, izvorno upravljane računalnim programom ili digitalnom datotekom.[1]



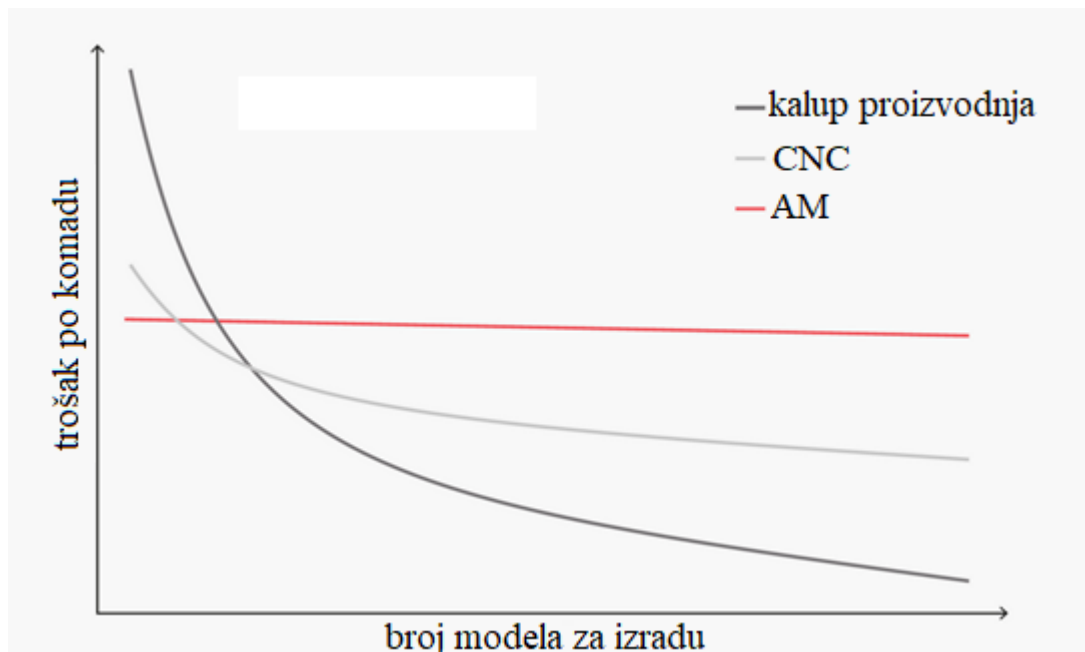
Slika 10. Tehnologija aditivne proizvodnje[1]

2.5.1. Odabir prave tehnologije

Pri odabiru između CNC-a i aditivne tehnologije postoji nekoliko jednostavnih smjernica koje se mogu primijeniti na proces donošenja odluka. Kao pravilo, svi dijelovi koji se mogu proizvesti s ograničenim naporom kroz postupak oduzimanja trebali bi biti obrađeni CNC-om. 3D ispis obično ima smisla samo u sljedećim slučajevima:

- ✓ Kada tradicionalne metode nisu u stanju proizvesti dio, na primjer, za vrlo složene, topološki optimizirane geometrije.
- ✓ Kada je vrijeme izrade kritično, odnosno zahtijeva što bržu isporuku, gdje se 3D tiskani dijelovi moraju isporučiti unutar 24 sata.
- ✓ Kada je niska cijena bitna; za male količine, 3D ispis općenito je jeftiniji
- ✓ Kada je potreban mali broj identičnih dijelova (manje od 10).
- ✓ Kada su potrebni materijali koji se ne mogu lako obrađivati, kao što su legure metala sa pogodnim svojstvima ili fleksibilni TPU.

CNC nudi veću dimenzijsku preciznost i proizvodi dijelove s boljim mehaničkim svojstvima u sve tri dimenzije, ali to obično dolazi s većom cijenom, osobito kada su količine male. Ako su potrebne veće količine (stotine ili više), ni CNC ni AM ne mogu biti troškovno konkurentne opcije. Tradicionalne tehnologije oblikovanja, kao što su lijevanje kalupa ili injekcijsko prešanje, općenito su najekonomičniji način zbog mehanizama ekonomije razmjera, što se vidi sa slike.[1]



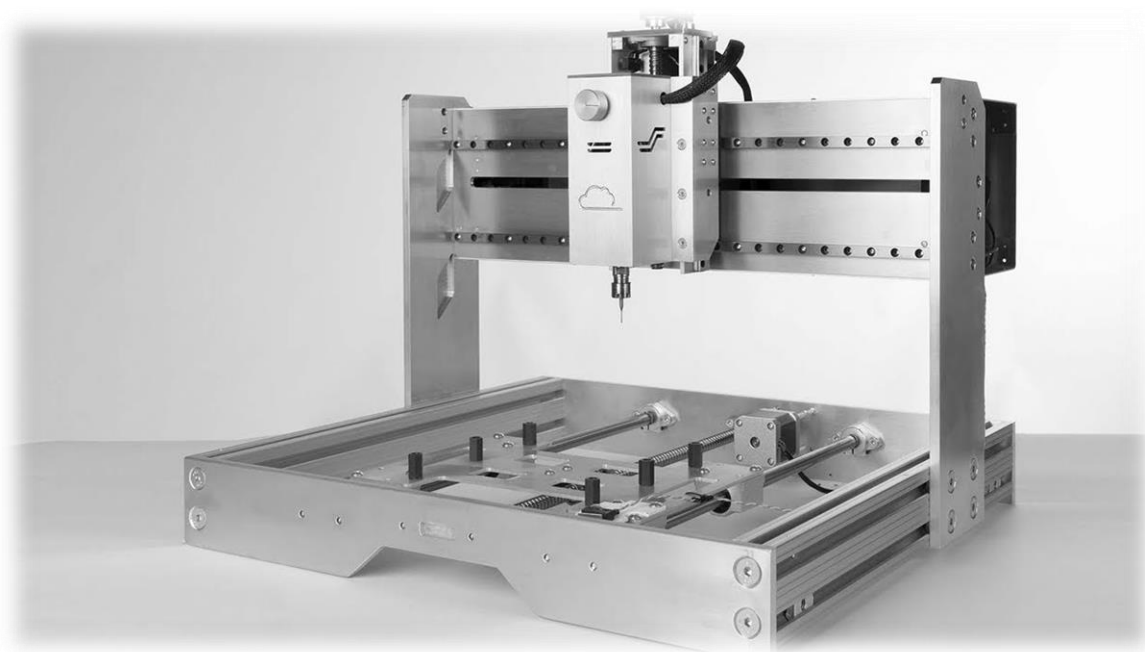
Slika 11. Dijagram ekonomije tehnologije izrade modela[1]

Tablica 2. Preporučeni proces po broju izrade modela[1]

	1	10	100	1000
<i>Plastika</i>	3D tisak	3D tisak, uzeti u obzir i CNC	CNC, moguća izrada plastičnog kalupa	Plastični kalup
<i>Metal</i>	3D tisak ili CNC	CNC, uzeti u obzir i 3D tisak	CNC, moguća izrada metalnog kalupa	Metalni kalup

2.5.2. Mjera točnosti

CNC obrada nudi čvrstu toleranciju i izvrsnu ponovljivost. Vrlo velike, a ujedno i vrlo male dijelove, CNC obrađuje s visokom točnošću. Zbog oblika reznog alata, unutarnji kutovi uvijek će imati radijus, ali vanjske površine mogu imati oštre rubove i mogu se strojno obrađivati vrlo tanko. Različiti 3D sustavi za ispis nude različitu dimenzijsku točnost. Industrijski strojevi mogu proizvesti dijelove s vrlo dobrim tolerancijama. Ako su potrebni manji razmaci, kritične dimenzije mogu biti 3D ispisane prevelike i zatim strojno obrađene tijekom naknadne obrade. Minimalna debljina stijenke 3D tiskanih dijelova ograničena je veličinom ekstrudera, odnosno mlaznice. Budući da se dijelovi izrađuju od jednog sloja odjednom, međuslojevi mogu biti vidljivi, osobito na zakrivljenim površinama, pa je maksimalna veličina modela relativno mala.[1]

**Slika 12. Stolni CNC stroj [1]**

Tablica 3. Opis tehnologija izrade modela[1]

	<i>Tolerancija</i>	<i>Min. Debljina sloja</i>	<i>Max. Veličina modela</i>
<i>CNC</i>	$\pm 0.025 - 0.125$ mm	0.75 mm	2000 x 800 x 1000 mm Ø 500 mm
<i>SLS</i>	± 0.300 mm	0.7 - 1.0 mm	300 x 300 x 300 mm
<i>FDM</i>	0.200 mm 0.500 mm	0.8 - 1.0 mm	900 x 600 x 900 mm 200 x 200 x 200 mm
<i>SLM/DMLS</i>	± 0.100 mm	0.40 mm	230 x 150 x 150 mm
<i>BJ</i>	± 0.200 mm	2.0 mm	380 x 355 x 735 mm

CNC se uglavnom koristi za obradu metala. Također se može koristiti za obradu termo plastičnih materijala, akrila, mekog i tvrdog drva te modeliranje pjena i voska.

2.5.3. Složenost modela

Postoje brojna ograničenja koja se moraju uzeti u obzir prilikom projektiranja dijelova za CNC obradu, uključujući pristup alata i razmake, mjesta držanja ili montiranja, kao i nemogućnost obrade kvadratnih kutova zbog geometrije alata. Neke su geometrije nemoguće za CNC strojeve, čak i kod petoosnih CNC sustava, jer alat ne može pristupiti svim površinama komponente. Većina geometrija zahtijeva rotaciju dijela za pristup različitim stranama, što zahtijeva vrijeme i dodatnu obradu te, u konačnici, veću cijenu.[1]

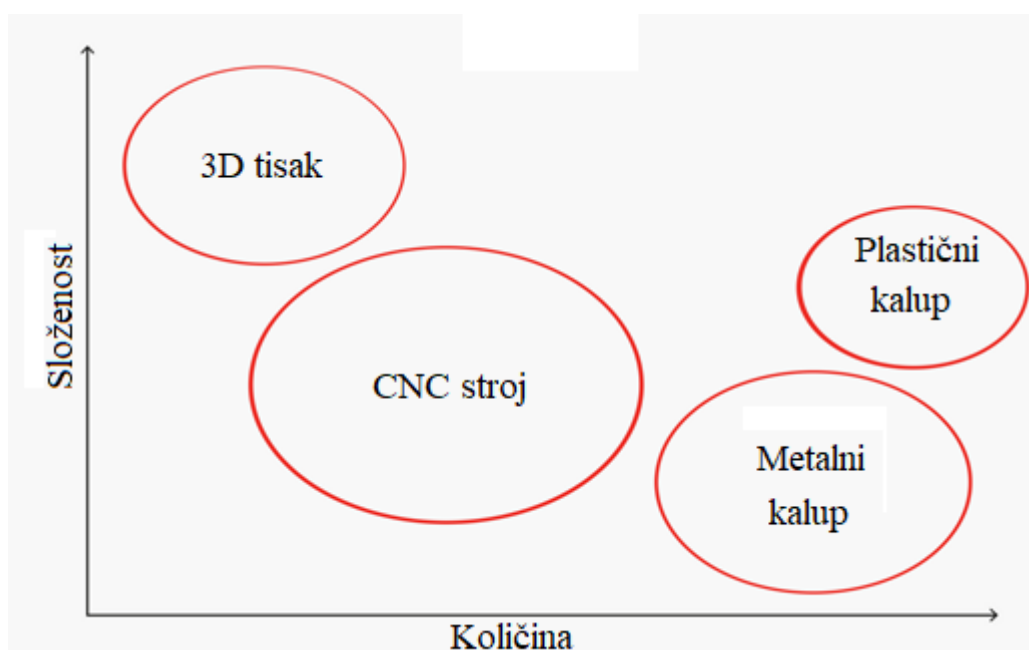


Slika 13. Petoosni CNC stroj

3D ispis ima vrlo malo ograničenja geometrije u odnosu na CNC. Strukture podrške su potrebne u većini tehnologija, kao što su FDM ili SLM / DMLS, i uklanjaju se tijekom naknadne obrade. Plastične slobodne forme, organske geometrije, mogu se lako proizvesti s procesima fuzije praškastog sloja na bazi polimera, kao što su SLS ili MJF, budući da ne zahtijevaju podršku. Sposobnost proizvodnje složenih geometrija jedna je od ključnih prednosti 3D tiska.[1]

Kod CNC-a, stručnjak ili inženjer prvo mora uzeti u obzir odabir alata, brzinu vretena, put rezanja kao i repozicioniranje modela, što uvelike utječe na kvalitetu konačnog modela i vrijeme izrade. Nakon strojne obrade, komponente su spremne za uporabu.

Prilikom 3D tiska, operater najprije priprema digitalnu datoteku čitljivu 3D stroju gdje će biti ispisan, uz vrlo malo ili bez ljudske intervencije. Kada je ispis završen, model treba očistiti i naknadno obrađivati, što je najintenzivniji aspekt rada u 3D proizvodnji.[1]

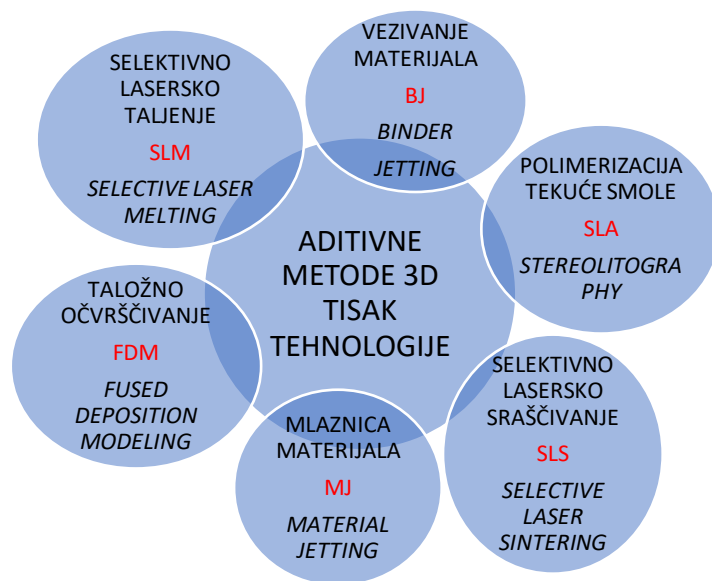


Slika 14. Dijagram odabira tehnologije izrade

CNC obrada najprikladnija je za srednje do velike količine (manje od 250 do 500 dijelova) i relativno jednostavne geometrije. 3D ispis općenito je najbolji za male količine (ili jednokratne prototipove) i složene geometrije. Pri razmatranju metala, CNC može biti konkurentan cijeni čak i za male količine, ali geometrijska ograničenja još uvijek vrijede. Kada su količine velike (više od 250 do 500 dijelova), prikladnije su druge tehnologije oblikovanja. Složenost modela i broj dijelova ključni su čimbenici pri odabiru pravog proizvodnog procesa što se vidi iz prikazanog dijagrama na slici 14.[1]

2.6. TEHNOLOGIJE 3D TISKA

Kao što je već opisano u prethodnom tekstu, sve 3D tisak tehnologije koriste aditivnu metodu, gdje se po prethodno digitalno dizajniranom modelu izrađuje fizički objekt. Kako bi se lakše definirale razlike u pojedinim tehnologijama, slikom će biti predložene osnovne razlike u tehnologiji izrade te razlike u materijalima koji se koriste.



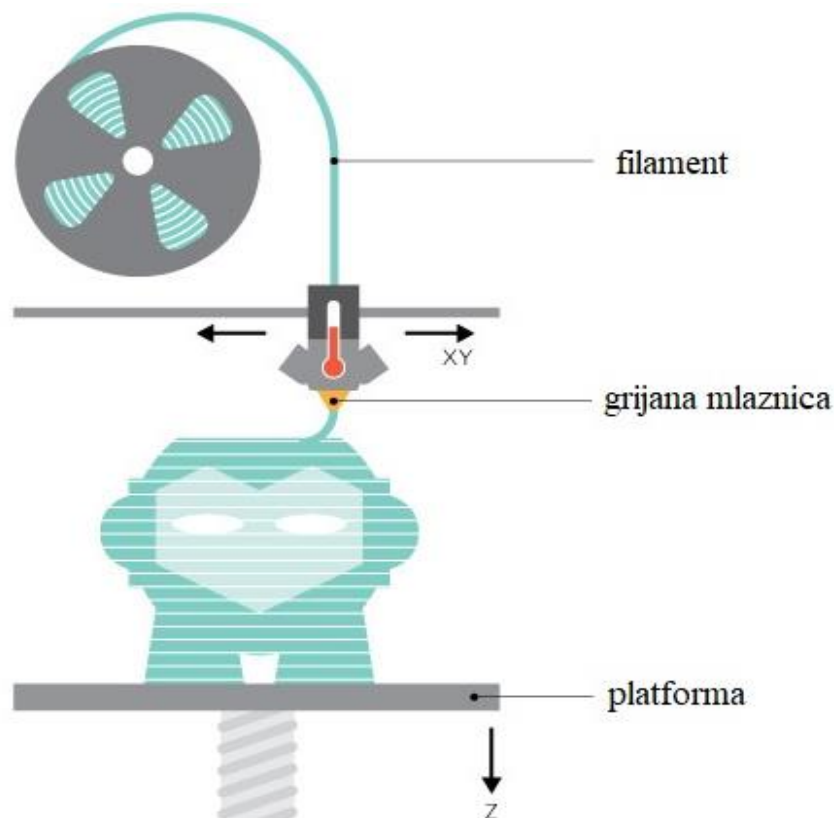
Slika 15. Procesi aditivne proizvodnje

2.6.1. Taložno očvršćivanje

Modeliranje deponiranjem rastaline ili taložno očvršćivanje (engl. *Fused deposition Modeling* – FDM) koristi čvrsti materijal zvan filament ili ispuna od kojeg sve započinje. Ova nit filameta pričvršćena je na 3D pisac pomoću rotirajućeg koluta koji pravilno otpušta željenu količinu na grijanu mlaznicu unutar 3D pisca koja topi materijal. Jednom kada se rastopi izvorni materijal filameta, taj se isti može deponirati na unaprijed određenoj putanji koju je stvorio softver na računalo. Budući da je materijal deponiran kao sloj predmeta, odmah se hladi i učvršćuje osiguravajući temelj za sljedeći sloj materijala sve dok se cijeli objekt ne proizvede, odnosno dok se ne završi proces tiskanja.

Kao najjeftinija 3D tehnologija tiska na tržištu, FDM nudi i široku paletu materijala koji se temelje na plastici u dugim bojama, uključujući ABS, PLA, najlon i još više egzotičnih mješavina materijala, kao što su ugljen, bronca ili drvo. FDM je izvrstan izbor za brzo i jeftino prototipiranje i može se koristiti za široku paletu aplikacija. Novije inovacije u

FDM 3D tiskanju uključuju sposobnost proizvodnje funkcionalnih završnih proizvoda s ugrađenom elektronikom i mehaničkim dijelovima kao što su manje letjelice popularno zvane dron. Zbog nekih dizajnerskih ograničenja te ograničenja zbog materijala, FDM 3D tisak ne preporučuje se za složene modele objekta. [9]

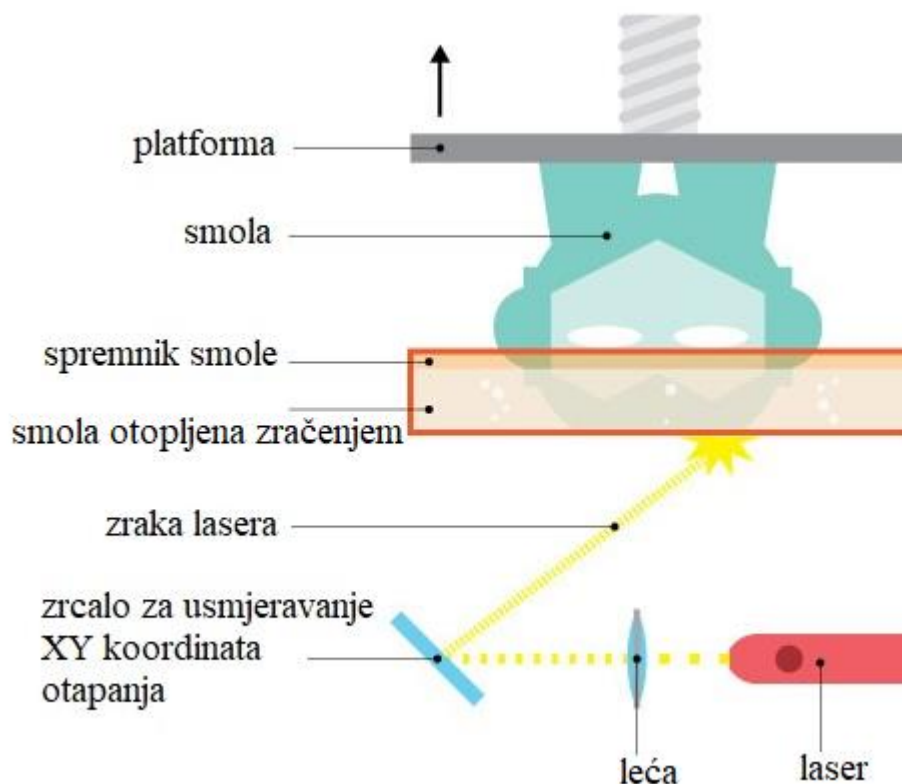


Slika 16. Opis rada i dijelovi FDM tehnologije 3D tiska[9]

2.6.2. Stereolitografija i digitalno mapiranje svjetla u izradu 3D objekta

Stereolithografija (engl. *Stereolithograph* – SLA) i očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (engl. *Digital Light Processing* – DLP) stvaraju 3D tiskane objekte iz tekuće (fotopolimeri) smole pomoću izvora svjetlosti kako bi se očvrstnuo tekući materijal.

Za izradu 3D tiskanog predmeta, temelj platforme je uronjen u prozirni spremnik ispunjen tekućom smolom. Jednom kad je temelj platforme potopljen, svjetlo smješteno unutar stroja mapira svaki sloj objekta kroz dno spremnika, čime se učvršćuje materijal. Nakon što se sloj mapira i učvrsti pomoću izvora svjetlosti, platforma se podigne i dopušta da sloj smole otječe ispod objekta. Ovaj se postupak ponavlja sloj po sloj dok željeni objekt nije završen. Danas postoje dvije uobičajene metode koje se razlikuju po izvoru svjetlosti: SLA koristi laser, dok DLP koristi projektor. [9]



Slika 17. Opis rada i dijelovi SLA tehnologije 3D tiska[9]

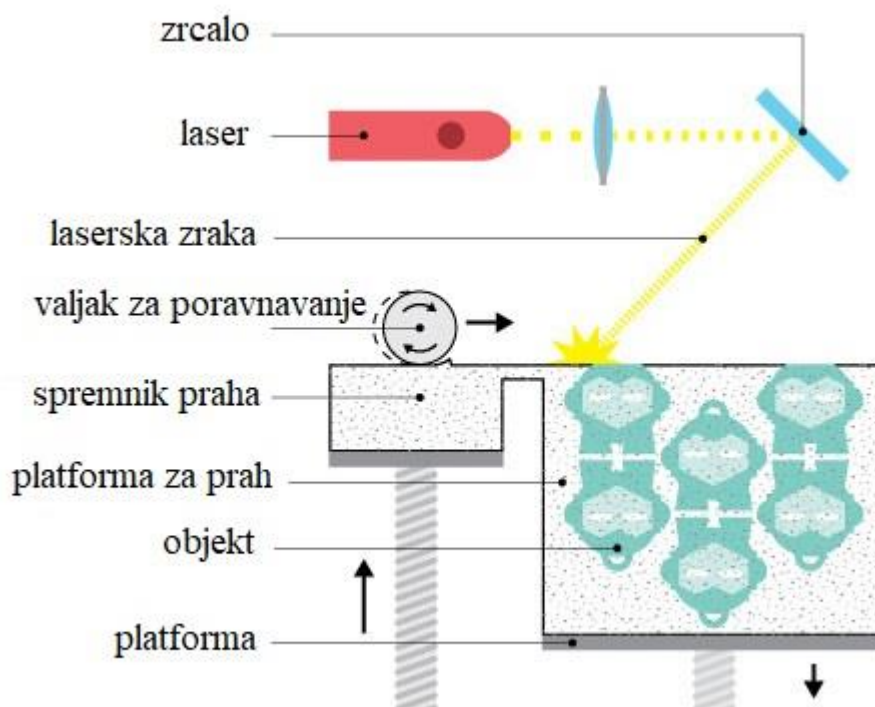
Ove tehnologije 3D ispisa dostupne su i za kućnu upotrebu s osobnim računalima. Materijali su ograničeni na smole, ali nedavno su se pojavile nove vrste koje pružaju snagu i fleksibilnost završnim objektima. [9]

SLA i DLP 3D pisači proizvode vrlo precizne dijelove s glatkim površinama i obično se koriste za vrlo detaljne skulpture, nakitne kalupe i prototipove. Zbog njihove relativno male veličine, ne preporučuju se za ispis velikih predmeta. [9]

2.6.3. Selektivno lasersko sraščivanje

Selektivno lasersko sraščivanje (engl. *Selective Laser Sintering* - SLS) koristi lasersku zraku za taljenje i učvrščivanje slojeva praškastog materijala u gotove objekte.

Ovi pisači imaju dva kreveta, odnosno platforme za izradu koji se nazivaju klipovi. Kada započne proces tiskanja, laserski se mapira prvi sloj predmeta u prahu koji selektivno otapa, odnosno sintetizira materijal. Kada sloj otvrdne, platforma za ispis lagano se spušta prema dolje, dok se druga platforma koji sadrži prašak pomiče i valjak širi novi sloj praha na vrhu objekta. Ovaj se postupak ponavlja, a laseri jedan za drugim rastapaju uzastopne slojeve dok se ne završi željeni objekt. [9]



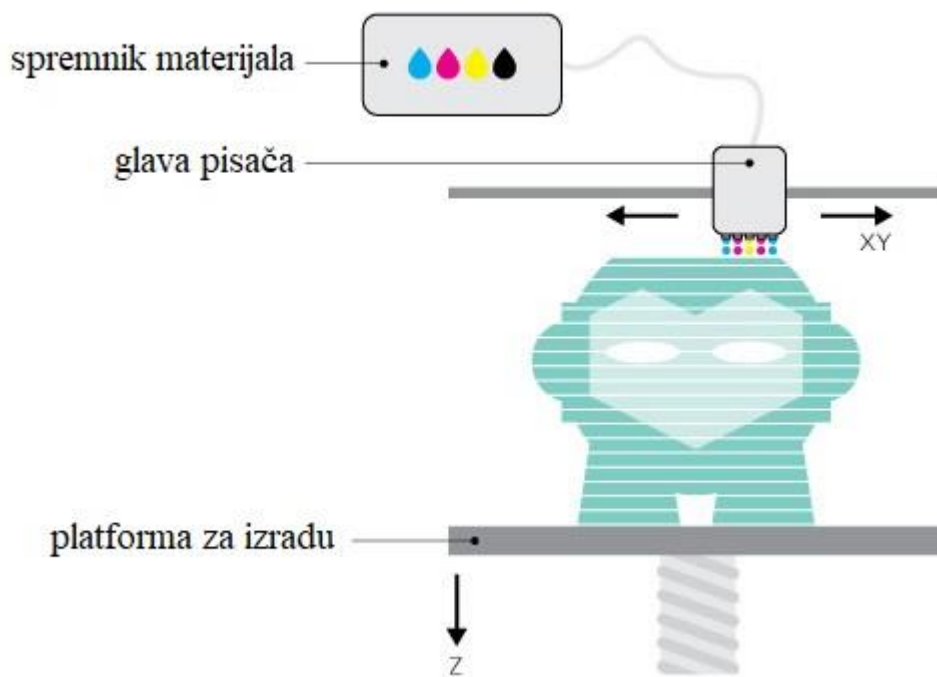
Slika 18. Opis rada i dijelovi SLS aditivne tehnologije [9]

SLS se uglavnom koristi za industrijske potrebe. Međutim, prve inačice stolnih, odnosno kućnih osobnih 3D SLS pisača već su se pojavile na tržištu, a daljnjim razvojem tehnologija očekuje se da će nastaviti prodirati na tržište proizvoda svakodnevne uporabe. Materijali uključuju različite plastike kao što su poliamidi (najlon), polistireni i termoplastični elastomeri. Selektivno lasersko sinteriranje široko se koristi za proizvodnju funkcionalnih prototipova i dijelova, kao i nekih krajnjih proizvoda. Najveća je prednost laserskog sinteriranja gotovo potpuna sloboda dizajna. Višak neiskorištenog praha djeluje kao potpora strukturi kako se proizvodi, što omogućava izradu složenih i zamršenih oblika bez potrebe za dodatnom potporom. Kao sporedni učinak ovog procesa, gotovi predmeti zahtijevaju više vremena za hlađenje, što uzrokuje dulje vrijeme isporuke. [9]

2.6.4. Mlaznica materijala

Tehnologije mlaznica materijala (engl. *Material Jetting* - MJ), poput Stratasys PolyJet i 3D Systems *MultiJet Modeling*, slične su tintnim ispisima. Umjesto ispiranja kapljica tinte na papir, 3D pisači mlaznim slojevima tekućeg fotopolimera, pomoću UV svjetla, gotovo neposredno pri izbacivanju materijala na platformi za izradu, suše i očvršćuju materijal.

Postupak izrade započinje kad писаč raspršuje tekući materijal na platformu za izradu. Nakon izbacivanja mlaznica slijedi UV svjetlo koje odmah otvrdne sitne kapljice tekućeg fotopolimera. Kako se postupak ponavlja, ti se tanki slojevi nakupljaju na platformi za izradu preciznog objekta. Ako složeni oblici ili viseći slojevi zahtijevaju potporanj, писаč izbacuje materijal koji se može ukloniti kao gel koji se privremeno upotrebljava, odnosno, lako se može ukloniti nakon dovršetka ispisa. [9]



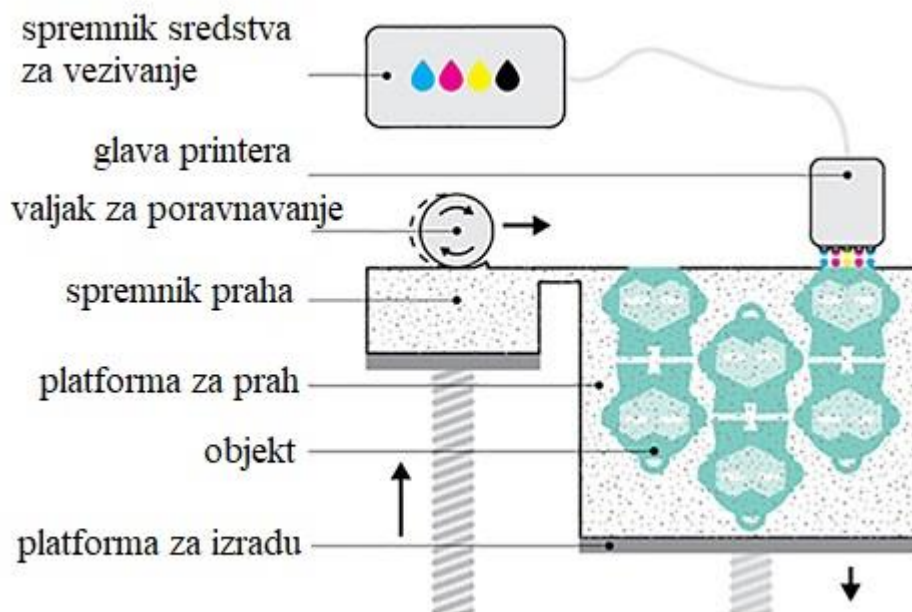
Slika 19. Opis rada i tehnologije izrade pomoću mlaznice za 3D tisak [9]

Ovakav se sustav koristi kod industrijskih 3D писаča. Izbor materijala sveden je na tekuće fotopolimere koji mogu pružiti različita dobra svojstva, uključujući žilavost, prozirnost ili fleksibilnost. Najnapredniji sustavi mogu čak koristiti više mlazova koji omogućuju kombinaciju različitih svojstava materijala i boja. *Material Jetting* nudi mnoge prednosti za brzu izradu alata i prototipova, jer korisnicima omogućuje stvaranje realističnih i funkcionalnih i preciznih prototipova s mnogo detalja. To su danas najpreciznije tehnologije 3D tiska, ispis slojeva do 16 mikrona (tanje od ljudske kose), što je zaista revolucionarno. [9]

2.6.5. Tehnologija povezivanja

Tehnologija vezivanja materijala (engl. *Binder Jetting* - BJ) slična je SLS-u odnosno Selektivno laserskom srašćivanju, na način da писаč koristi tanke slojeve praškastog

materijala za izgradnju objekta, ali umjesto korištenja lasera koji sintetizira sloj zajedno, ovi pisači koriste sredstvo za vezanje koja se istiskuje iz mlaznice te povezuje prašak. [9]



Slika 20. Opis rada i tehnologija izrade pomoću tehnologije vezivanja [9]

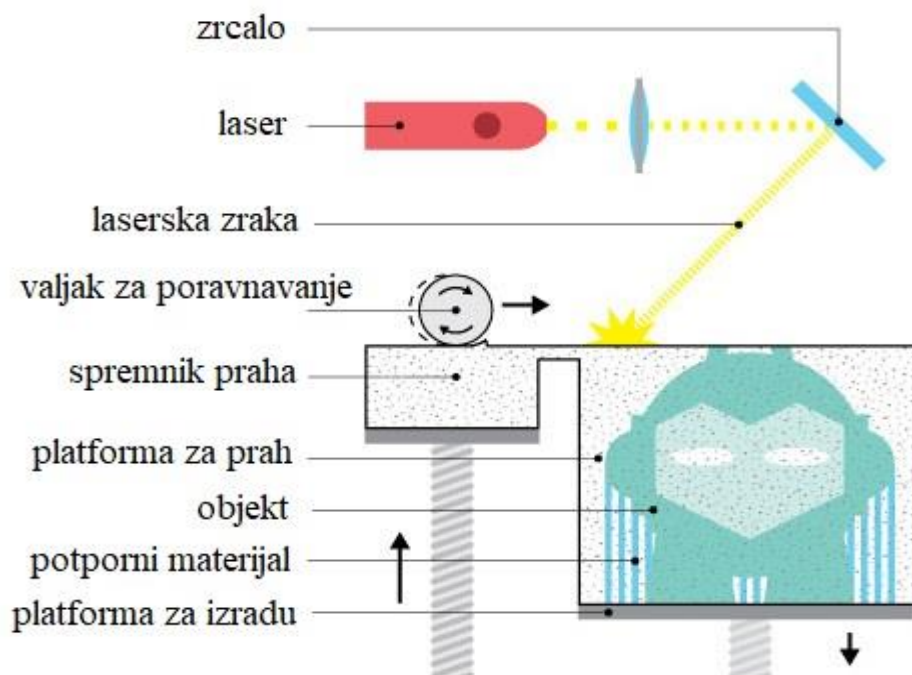
Postupak započinje s mlaznicom koja širi sredstvo za vezanje preko prvog sloja objekta i povezuje prah u jedno tijelo. Kad se prvi sloj spoji s temeljem za vezanje, tiskarska se platforma lagano spušta i tanki sloj novog praha se širi na vrhu objekta. Ovaj se postupak ponavlja sve dok se željeni objekt ne formira. Nakon što se ukloni s pisaćeg sloja, predmet se čisti od suvišnog praha i obloži ljepljivim sredstvom kako bi očvrstnuo te očuvao dugotrajnost boje. Binder Jetting koristi se u industrijskom 3D ispisu, s najčešćim materijalom koji je nalik prahu u boji, odnosno birani pijesak. To je relativno povoljno u odnosu na SLS jer proces tiskanja zahtijeva manje vremena, ali tiskani su objekti manje otporni nego kod SLS tehnologije. Sposobnost ispisa u svim bojama olakšava izradu arhitektonskih modela i živopisnih skulptura. Slično SLS-u, prednost ovog postupka jest to što neupotrebljivi dio praha djeluje kao potpora strukturi kako se proizvodi, što omogućuje izradu složenih oblika i nije potrebna dodatna potpora visećim dijelovima objekta. [9]

2.6.6. Selektivno taljenje i elektronsko taljenje metala u 3D tehnologiji

Selektivno taljenje (engl. *Selective Laser Melting* - SLM) i elektronsko taljenje (engl. *Electronic Beam Melting* - EBM) dvije su najčešće 3D tehnologije tiskanja metala. Baš kao i SLS, ovi procesi stvaraju objekte iz tankih slojeva praškastog materijala

selektivnim topljenjem pomoću izvora topline. Zbog višeg tališta metala oni zahtijevaju puno više snage, točnije lasersku snagu u slučaju SLM ili elektronskog snopa za EBM. Tijekom procesa tiskanja, stroj distribuira sloj metalnog praha na platformu za izradu, koja se rastopi laserskim (SLM) ili elektronskim snopom (EBM). Potom se spušta platforma za izradu, ona se onda prekriva novim slojem metalnog praha na vrhu, a postupak se ponavlja sve dok se objekt potpuno ne formira. [9]

I SLM i EBM zahtijevaju strukture za potporu pa se fiksiranjem objekta dobiva objekt veći od krajnjeg proizvoda, što također treba uzeti u obzir. Osim toga, SLM se odvija u prostoru sa manjom količinom kisika i EBM-a u vakuumu, kako bi se smanjila toplinska naprezanja i spriječilo savijanje i deformacija objekta. SLM i EBM koriste se u industrijskom 3D ispisu. Materijali uključuju različite metale i legure uključujući čelik, titan, aluminij, kobalt-krom i nikal. Metalni tisak smatra se „svetim gralom“ aditivne proizvodnje i 3D tiskanja; široko se koristi u zrakoplovnoj, automobilskoj i zdravstvenoj industriji za niz visokotehnoloških, složenih prototipova prije završne proizvodnje na velike količine. 3D tiskani metalni dijelovi omogućuju monolitnu konstrukciju (smanjenje količine komponenti) i smanjenje mase. SLM i EBM razvili su se do te faza gdje su objekti izrađeni pomoću ove 3D tehnologije usporedivi s tradicionalno proizvedenim dijelovima u smislu kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (statičkih i dinamičkih), kao i mikrostrukture. [9]



Slika 21. Opis rada i tehnologija izrade pomoću selektivnog taljenja [9]

2.7. IDEALNI 3D PISAČ

Idealni 3D pisac jest onaj koji odgovara zadanom postupku, svojim načinom proizvodnje, kvalitetom izrade, materijalom, kao i ekonomskom stavkom koja uvelike diktira odabir 3D pisaca. U brodskoj industriji i transportu uzima se glavna varijabla ekonomske isplativosti. Nakon te stavke filtrira se mogući odabir, prostor gdje će se i za što će se koristiti 3D pisac. Uzimajući u obzir osnovne uvjete broda - štednju prostora, vibracije i nagib broda, uvjete rada, sposobnost radnika na brodu, dolazi se do zaključka da je idealan pisac upravo FDM pisac, odnosno modeliranje deponiranjem rastaline ili taložno očvršćivanje. Za primjer imamo konkretnu upotrebu u svemiru gdje su ispunjena sva očekivanja ovakvog printera. Svojstvo tiskanja u različitim pozicijama svakako mu ide u korist kod upotrebe na brodu, kao i jednostavnost korištenja i održavanja.



Slika 22. Izrada potrebnog alata u svemiru uz pomoć FDM 3D tehnologije [9]

Postoje i izvedbe s dvije glave, prva koja deponira osnovni materijal odnosno odabranu plastiku i druga glava koja istovremeno deponira materijal kojim se jača ta plastika

te se stvara legura koja, prema istraživanjima, u više slučajeva nadmašuje svojstva originalnih materijala, odnosno dijelova koji su zamijenjeni tehnologijom 3D tiska, konkretno - legura je čvršća od aluminija. Jedna od bitnih stavki je da FDM tehnologija ne zahtijeva posebne uvjete kao neke druge 3D tehnologije izrade. Međutim, skladištenje samog materijala mora ispunjavati zadane parametre kako bi ispunjavali predviđena svojstva. Skladište materijala mora biti bez vlage, što je strogi uvjet kojeg nije lako ispuniti u uvjetima koje pruža broderska industrija. Drugi uvjet skladištenja jest odsutnost UV zraka i sobna temperatura. PA najlon, o kojem će se nešto kasnije u ovom radu obratiti pažnja, mora biti u strogim uvjetima skladištenja bez vlage. Na slici 23., prikazan je industrijski FDM pisač koji ima zatvoren prostor za tiskanje u prilagođenim uvjetima za poboljšane industrijske materijale.



Slika 23. Industrijski FDM pisač [10]

Ono što daje prednost ovoj tehnologiji 3D tiska jest jednostavnost korištenja i održavanja. Postoji mogućnost samoodržavanja uređaja kao i korištenje bez prisustva čovjeka. Minimalno održavanje i mogući kvarovi jednostavni su za popravak uz opis samog kvara što zahtijeva minimalno znanje o samom sustavu. U razvoju tehnologije, ponajprije razvoju materijala za FDM tehnologiju, donosit će se nova rješenja i mogućnosti, a ujedno i bolja iskoristivost, što će uvelike utjecati i na ekonomsku stavku - prvi i jedini uvjet kapitalističkog svijeta. [7]

3. PRIČUVNI DIJELOVI

Brod kao tehnički složeno i skupo sredstvo prijevoza putnika i tereta morem te unutrašnjim morskim vodama svoju funkciju obavlja po specifičnim ekonomskim zakonitostima kojima se mora prilagoditi kako bi mogao uspješno poslovati. Na ekonomičnost poslovanja brodarskog društva i konkurentnosti na tržištu broskog prostora utječu mnogi čimbenici među kojima se, uz ostale organizacijske djelatnosti, ističe održavanje. Pod pojmom održavanja podrazumijeva se sprječavanje kvarova na brodskim sustavima, produženje vremena njihova korištenja te otklanjanje nastalih kvarova na najučinkovitiji način. Održavanje čini jednu od komponenti terotehnologije. Pored proučavanja i izvođenja održavanja za vrijeme korištenja sredstva, terotehnologija se bavi osmišljavanjem održavanja tijekom projektiranja te organizacijom održavanja. Osnovna je svrha terotehnologije optimalizacija troškova održavanja. Pod tim pojmom podrazumijeva se postizanje takve tehnologije i organizacije održavanja kod koje je zbroj izravnih troškova (troškovi zahvata) i neizravnih troškova (troškovi zastoja) najmanji. [10]

3.1. PRISTUPI ODRŽAVANJA BRODA

Svaki od općih pristupa održavanja ima svojih prednosti i nedostataka. Održavanje brodskih sustava zahtijeva primjenu oba prije navedena opća pristupa. Preventivnim održavanjem nastoji se spriječiti kvar na način da se komponente sustava, odnosno njeni elementi, zamijene na vrijeme. Troškovi će biti najmanji ako se komponenta zamijeni novom neposredno prije kraja njena korisnog vijeka koji se kreće unutar 60% prosječnog vijeka trajanja komponente. Kvarovi nastali uslijed dotrajalosti trebali bi biti u potpunosti izbjegnuti preventivnim održavanjem. Slučajni se kvarovi takvim načinom održavanja mogu umanjiti, ali ne i u potpunosti spriječiti. Neke od prednosti preventivnog održavanja su sljedeće:

- ✓ bolje udovoljavanje postavljenim uvjetima sigurnosti i pouzdanosti te bolja ekonomska iskoristivost broda,
- ✓ smanjeni broj zastoja broda zbog kvara,
- ✓ moguće usklađivanje poslova održavanja temeljenih na planu s ekonomskim uvjetima pod kojima brod posluje,
- ✓ posada broda izvodi održavanje na osnovu plana
- ✓ općenito sustavi imaju manji broj kvarova.

Neki od nedostataka koje povlači pristup preventivnog održavanja su sljedeći:

- veća učestalost zahvata održavanja na sustavima,
- veći utrošak pričuvnih dijelova,
- veća cijena troškova održavanja.

Preventivno održavanje daje bolje rezultate kod brodskih sustava koji utječu na zastoje broda. Cijena koštanja stajanja broda je značajna, a isto tako i posljedice koje takav zastoj ima u cjelokupnom transportnom lancu mogu prouzročiti velike dodatne troškove. Također, otkazivanje značajnih sustava broda može ugroziti i njegovu sigurnost. Korektivni pristup podrazumijeva poduzimanje zahvata tek kada se kvar dogodi, odnosno kada komponenta sustava zakaže. Iskoristivost komponenti nije temeljena na njihovom procijenjenom korisnom vijeku trajanja kao što je to slučaj kod preventivnog održavanja. Pojedine komponente zakažu u periodu od završetka procijenjenog korisnog vijeka trajanja do prosječnog vijeka trajanja, međutim neke nadžive svoj prosječni vijek trajanja. Uspoređujući s preventivnim održavanjem, broj komponenti u određenom je vremenskom periodu manji, što ujedno povlači i manji broj zahvata održavanja. Međutim zastoji su nepredvidljivi, uobičajeno dulji i s većim troškovima održavanja. Prednosti korektivnog održavanja su:

- ✓ iskoristivost komponenti sustava je u cijelosti,
- ✓ manji troškovi pričuvnih dijelova,
- ✓ nema troškova održavanja dok komponenta sustava ne zakaže.

Neki od nedostataka korektivnog održavanja su sljedeći:

- povećani broj zastoja broda,
- slabija ekonomska iskoristivost broda, manja razina pouzdanosti i sigurnosti,
- posada broda može biti izložena zahtjevima prilikom otklanjanja kvara koji nadilaze njihove radne mogućnosti,
- vrijeme zastoja broda je uobičajeno duže.

Korektivno održavanje pogodno je za brodske sustave, odnosno komponente pojedinih sustava koji nemaju značajniji utjecaj na sigurnost broda i njegovo ekonomsko iskorištavanje. Uobičajeno su to sustavi i komponente kod kojih nisu predviđeni pričuvni dijelovi, odnosno kod kojih nastupaju slučajni kvarovi. [11]

3.2. BUDUĆNOST PRIČUVNIH DIJELOVA

Posao izrade, skladištenja i isporuke rezervnih dijelova traje određeno vrijeme, osobito na brodu, i predstavlja poteškoće za dobavljače rezervnih dijelova, kao i za svoje kupce. Održavanje zaliha pričuvnih dijelova koji se ne koriste također često stvara trošak, stoga ti naručeni dijelovi u konačnici ispadaju toliko skupi da ih dobavljači jednostavno povuku iz ponude, što predstavlja velik problem pri održavanju. Takva situacija na tržištu pričuvnih dijelova prisiljava korisnike na pohranu velikih zaliha dijelova ili na jednako skupo rješenje, potragu za proizvođačima treće strane. [10]

Upravo zbog ovakve situacije na tržištu, pojavom 3D tiska odnosno raznih aditivnih metoda pronalazi se jeftino rješenje i budućnost pričuvnih dijelova u novoj industriji. Izradom prototipova može se ispitati kvaliteta samog dijela, što ne iziskuje znatne troškove. Pričuvni dijelovi mogu se izrađivati na lokacijama bližim za dostavu ili na samom brodu, što je i ideja ovog diplomskog rada. Tržište pričuvnih dijelova je poljuljano pa broderske tvrtke ulaganjem u ovu tehnologiju mogu zaobići dosadašnje dobavljače, što će se u konačnici i dogoditi ako se dobavljači i proizvođači ne prilagode tržištu i trendu razvoja 3D tehnologije tiska. Skladištenje također ima novi pojam koji se na velika vrata pojavljuje na tržištu kroz zadnjih desetak godina, a to je pohrana u oblaku (engl. cloud). U slučaju posjedovanja digitalne inačice modela za tisak, taj se model može izraditi bilo gdje na svijetu uz osobno računalo, Internet poveznicom te uređajem za 3D tisak. Stoga bi bilo logično promišljati da se izrada pričuvnog dijela vrlo jednostavno primijeni na brodu, bez obzira gdje se brod nalazio. Skladištenje od tog trenutka smanjujemo na skladište materijala za aditivne tehnologije izrade pričuvnih dijelova.

3.2.1. Utjecaj na tržište pričuvnih dijelova

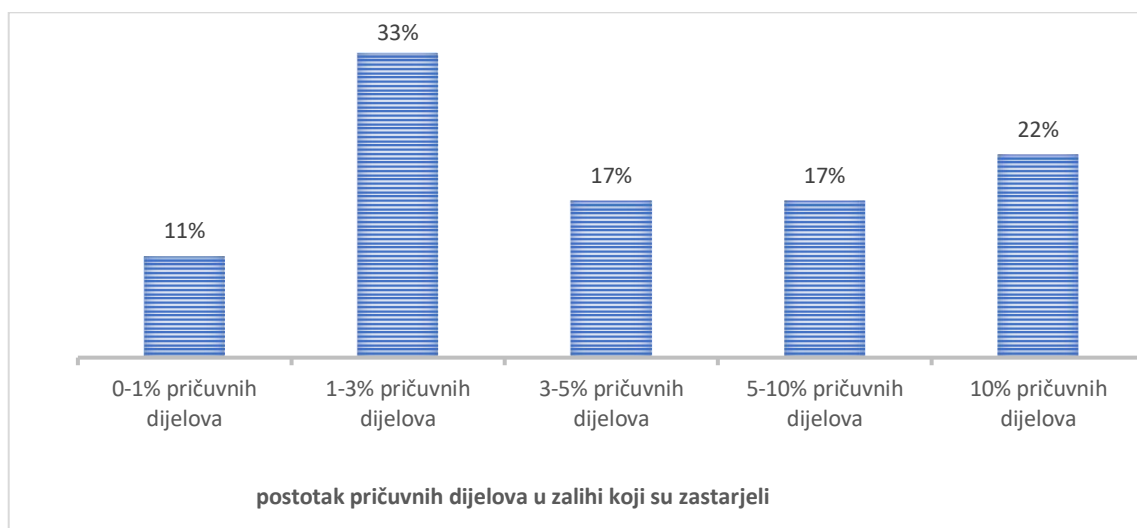
Provedenim ispitivanjem 38 glavnih Njemačkih tvrtki 2015. godine, zaključeno je kako će 3D tisak zauzeti glavnu ulogu u tržištu pričuvnih dijelova, što također vrijedi i za brodersku industriju. Međutim, prilikom ispitivanja nisu svi bili svjesni svih prednosti koje donosi 3D tehnologija tiska. U daljnjem tekstu bit će navedeno nekoliko važnijih zaključaka donesenih prilikom ispitivanja o utjecaju aditivne tehnologije na pričuvne dijelove. [10]

Trenutno, dobavljači pričuvnih dijelova ne ispunjavaju potrebe kupaca - 50% kupaca istražiti će kako treba isprintati potreban dio. Proizvodi od strane industrijskih tvrtki su složeni i sastavljeni od više različitih dijelova; mnogi od njih će morati biti zamijenjeni tijekom trajanja opreme. Osim toga, proizvodi se koriste na lokacijama širom svijeta. Kada

kupac treba određeni zamjenski dio, to može biti izazov za dobavljača gdje oni moraju pružiti visoku razinu usluge, a istodobno i održavanje troškova. Da bi se ispunile sve potrebe kupca, dobavljač rezervnih dijelova mora upravljati složenom mrežom dobavljača, proizvodnje, prodaje i kupaca, od kojih od svih zahtijeva važne strateške odluke, uključujući sljedeće:

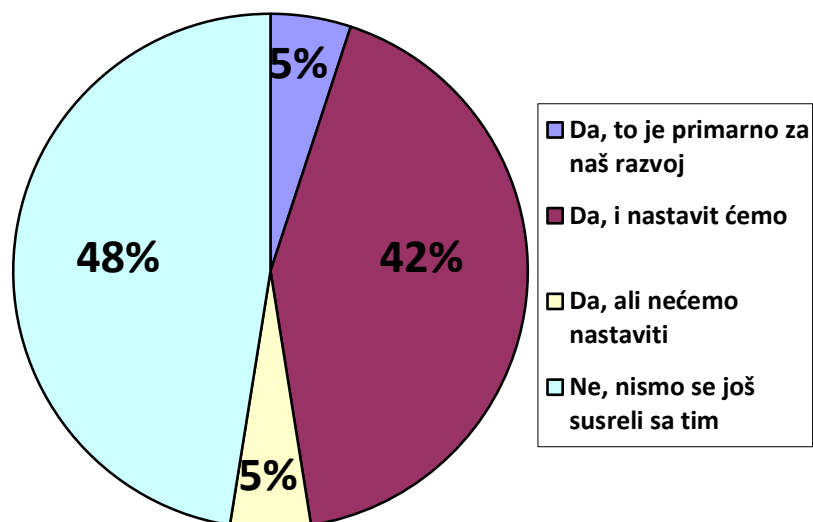
- hoće li napraviti ili kupiti dio
- želi li napraviti zalihi ili ju naručiti
- gdje proizvoditi dio
- koju razinu usluga nuditi
- hoće li nastaviti s radom ili ga prekinuti.

Pri korištenju konvencionalnih metoda proizvodnje, dobavljač rezervnih dijelova mora napraviti kompromise između njihove razine usluge i njihovih troškova. Kod 22 posto ispitanika, više od deset posto ih je izjavilo kako su rezervni dijelovi koje čuvaju u zalihi zastarjeli ili ne pridonose smanjenju troškova, a većina ispitanika vjeruje da barem tri posto zaliha pričuvnih dijelova predstavlja trošak.

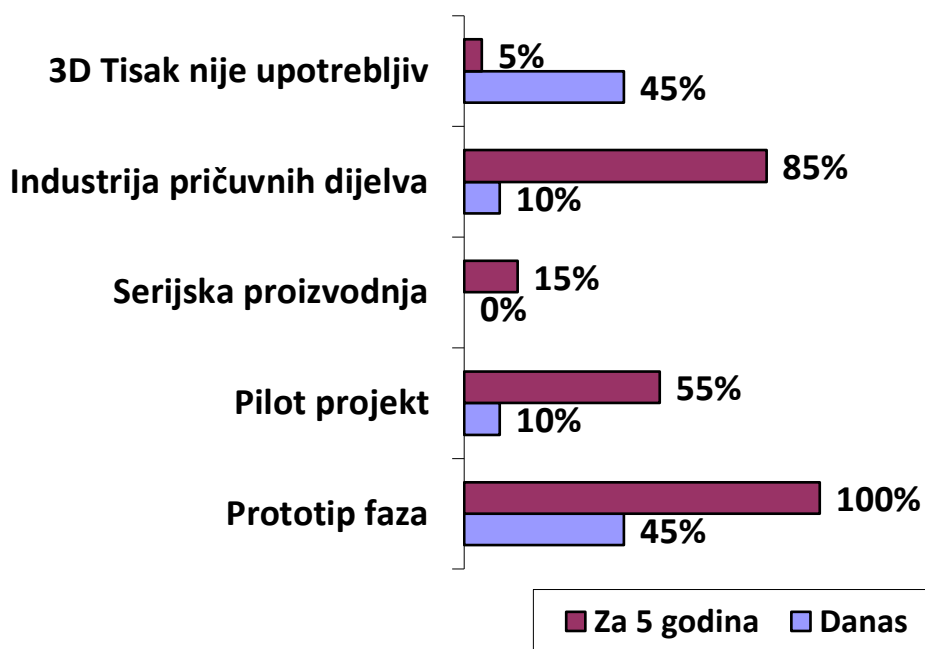


Slika 24. Podaci o zastarjelosti pričuvnih dijelova u tvrtkama [3]

Kao posljedica ovakvog trenda, tvrtke kalkiliraju kvotu izrade pričuvnih dijelova i prelaze iz načina dostave iz skladišta prema krajnjem korisniku u dostavu pri izradi samog dijela. Takav način rada smanjuje kvalitetu usluge u smislu dužeg čekanja pri izradi. [3]

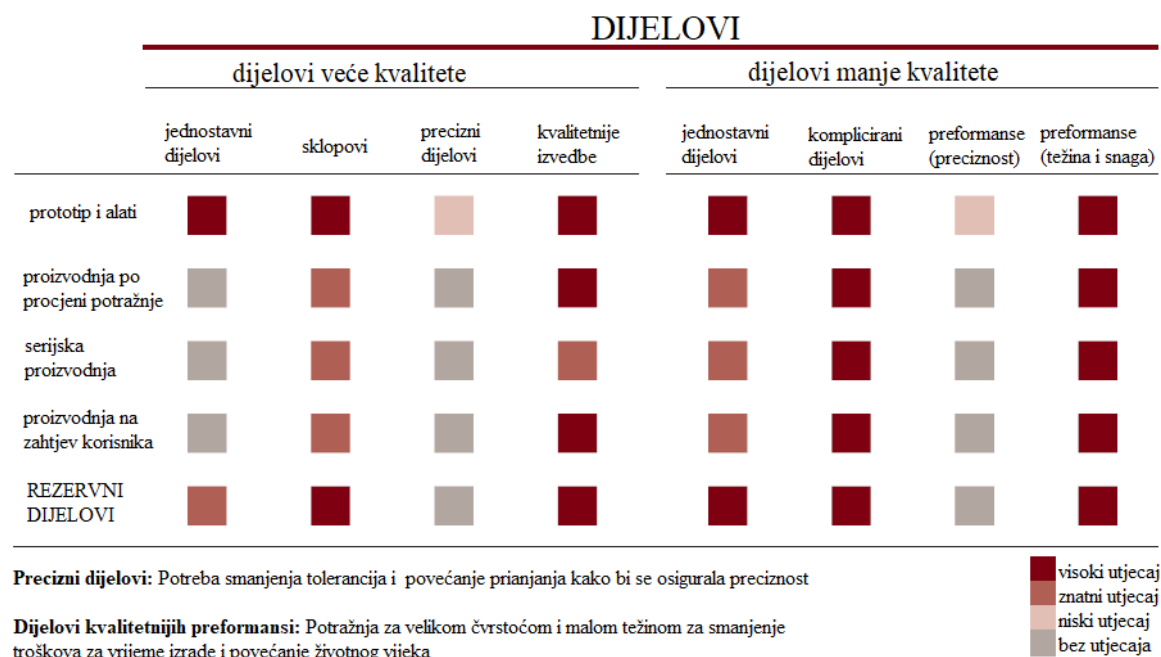


Slika 25. Mogućnost tiskanja vlastitih potreba za rezervnim dijelovima [3]



Slika 26. Očekivanja razvoja 3D tehnologije u različitim fazama proizvodnje[3]

Kroz narednih pet godina 85% dobavljača rezervnih dijelova implementirat će 3D tehnologiju u svojim postrojenjima i strateškim ciljevima. Toplinska karta označava mjesto gdje vidimo 3D tisak u proizvodnim procesima. Podaci pokazuju jasan trend: 3D tisak će preuzeti glavnu ulogu za manje kvalitetne dijelove, složene dijelove velikih količina i dijelove zahtjevnih karakteristika te prototipove koji će skratiti vrijeme implementacije novih proizvoda. [3]



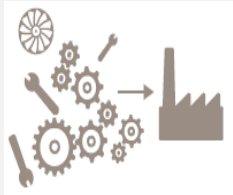
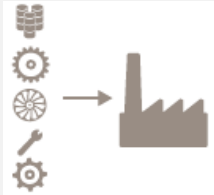




Slika 27. Toplinska mapa utjecaja u različitim proizvodnim procesima [3]

U narednih će deset godina Njemački dobavljači rezervnih dijelova godišnje štedjeti 3 milijarde eura koristeći 3D tehnologiju. Operativne prednosti tiskanja rezervnih dijelova su jasne. Kao prvo, bit će znatno smanjen broj rezervnih dijelova koje tvrtke trebaju držati u inventaru, budući da 3D tisak omogućuje drugi način skladištenja. Prekidi proizvodnje uslijed kvara i vrijeme čekanja zamjene uz rezervni dio mogu biti smanjene na minimum. Čak i ako je potrebna dodatna strojna obrada, cjelokupno vrijeme postavljanja uvelike se smanjuje. Drugo, dijelovi mogu biti proizvedeni tamo gdje su potrebni, a za primjer se uzima brod. Tako će se osigurati da su dijelovi dostupni kada ih kupci trebaju, uz kraće odnosno minimalno vrijeme isporuke i manje planiranja logistike. Ograničenja za proizvodnju kao što su izvedivost i troškovi proizvodnje nisu jedine stavke. Potpuni potencijal 3D tiska ne postaje vidljiv sve dok tvrtke ne uključe sveukupne učinke opskrbnog lanca. [3]

Razmislite o dobavljaču koji treba određeni pričuveni dio te je u mogućnosti naručiti ga s web stranice proizvođača. Za nekoliko sati, 3D usluga ispisa u blizini kupca prima nalog, ispiše ga nakon preuzimanja tog naloga sa oblaka za pohranu datoteka pričuvenih dijelova i isporučuje ga kupcu. S druge strane, proizvođač može poslati i 3D datoteku za preuzimanje, gdje može ispisivati rezervni dio na vlastitoj opremi, pa tako i na brodu, kako bi se izbjegli bilo kakvi troškovi čekanja i isporuke. Proizvođači također mijenjaju sustav naplate rezervnog dijela kao intelektualno vlasništvo te više ne prodaju dio, već model koji mogu

uvijek poboljšavati. Stoga, nemaju potrebu za skladištenjem pričuvnih dijelova, već skladište dijelove 3D printera i osiguravaju materijal i modele potrebne za njihovu izradu.

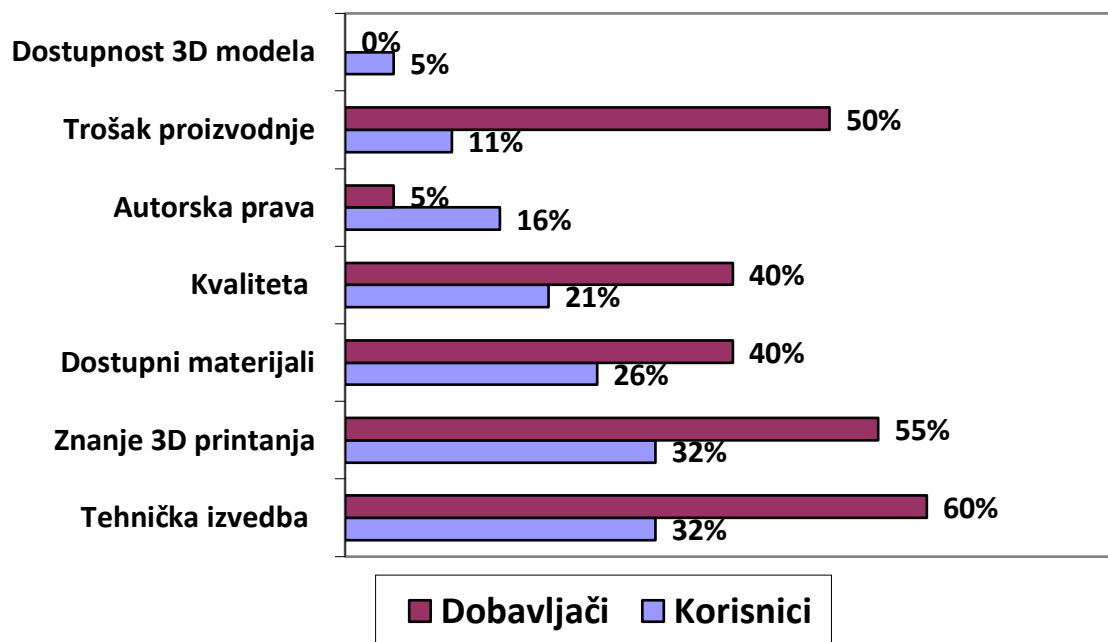
Tablica 4. Kako 3D tehnologija utječe na dobavljački lanac [3]

	<i>TRENUTNO STANJE</i>	<i>3D TISAK</i>	<i>PREDNOSTI 3D TISKA</i>
<i>IZVOR</i>	 <p>50 dijelova poslano sa različitih adresa</p>	 <p>5 komponenti poslano sa jedne adrese</p>	<p>Pojednostavljen dobavljački lanaca, manje dobavljača, Proizvodnja po narudžbi odnosno po potrebi</p>
<i>IZRADA</i>	 <p>Jeftina proizvodnja i potražnja za jeftinom dostavom</p>	 <p>Kvalitetna proizvodnja u blizini potrebne adrese dostave</p>	<p>Manje zaposlenih , stoga nema potrebe za potražnjom jeftine radne snage</p> <p>Nisu potrebni posebni alati, Brži odziv na potrebu izrade</p>
<i>DOSTAVA</i>	 <p>Organizacija dostave Dostavljanje nakon što se prikupi dovoljno dijelova za isplatu dostave</p>	 <p>Lokalna dostava Dijelovi tiskani isti dan i dostavljeni na željenu adresu</p>	<p>Lokalna proizvodnja</p> <p>Brz odziv</p> <p>Bez troškova skladištenja</p> <p>Jeftina dostava</p> <p>Brza dostava</p>

Ubrzani proces ulaska 3D tehnologije u više grana industrije i proizvodnje dovodi do problema nedostatka kvalitetne radne snage osposobljene za rad. Najveći izazov ovakve tehnologije jest manjak dizajnera 3D modela odnosno ljudi specijaliziranih za stvaranje modela po potrebi kupaca.

Pokazano je da kvaliteta 3D-tiskanih dijelova može biti jednaka kvaliteti dijelova proizvedenih konvencionalnim metodama, a u nekim slučajevima kvaliteta može biti i veća. Dostupnost materijala koji se koriste u 3D tehnologiji tiska brzo se povećava, većina najčešće korištenih materijala danas su široko dostupni, a cijene će i dalje padati. Međutim, očigledna su tri glavna područja koja treba poboljšati s tehnološke točke gledišta kako bi se povećalo njeno područje primjene. Prostorna razlučivost i finoća izrade 3D pisača treba se poboljšati.

- Mnogi 3D-tiskani dijelovi moraju se podvrgnuti dodatnom koraku kao što je strojna obrada ili bušenje prije korištenja.
- Brzina 3D pisača i njihovih srodnih softvera treba se povećati.
- 3D tiskani materijali moraju biti standardizirani i ujednačeni. Opće materijalne norme još ne postoje, tvrtke moraju postaviti i zadovoljiti standarde kvalitete za svoje rezervne dijelove i još važnije, za materijale i tiskarske procese.



Slika 28. Prepreke i 3D tehnologije u industriju izrade pričuvnih dijelova [3]

3.3. PLAN IMPLEMENTACIJE 3D TEHNOLOGIJE TISKA

Većini tvrtki bit će potrebno više vremena i više povjerenja u zrelost 3D tiska i uštedu na troškovima tehnologije 3D ispisivanja prije nego se bude oslanjala na takvu tehnologiju u svim područjima rada. No, tvrtke koje sad ulažu sigurno će biti u prednosti u narednim godinama. Proces koji trebaju proći dobavljači sastavljaju se iz šest ključnih točaka. [3]

Tvrtkama je potrebno analizirati vrijednost potreba za pričuvnim dijelovima. Analiza treba obuhvatiti ključni pokazatelji uspješnosti, minimalnu količinu narudžbe, vrijeme isporuke i ukupni trošak. Ovo je temelj za izgradnju poslovnog projekta, što omogućuje jasnu identifikaciju dijelova u kojima će 3D tisak donijeti najveću korist.

Sljedeći je korak izvršiti studiju izvedivosti 3D ispisa i tehničku analizu kako bi se odredilo koji su pričuveni dijelovi „ispisivi“, te formirati grupu koju je moguće 3D tiskati.

Treći je korak ispitivanje postojećih nacrti. Ako je moguće, treba redizajnirati svoje dijelove te otkriti puni potencijal 3D ispisa. Na primjer, izraditi skup pojedinih dijelova za montažu kao jedan 3D-tiskani dio.

Četvrti korak predstavlja razvijanje poslovnog projekta. Treba utvrditi uštede potencijala sustava portfelj rezervnih dijelova, kao i štedni potencijal pojedinih dijelova kao glavnih čimbenika.

Peti je korak odrediti strategiju 3D tiskanja pričuvnih dijelova. Ta strategija treba pokriti cijeli opskrbeni lanac, kao i mogućnost prodaje stvarnih dijelova.

Sljedeći korak podrazumijeva izradu pilot projekta strategije 3D ispisa. Pilot projekti neophodni su za testiranje, poboljšanje i prilagodbu sposobnosti i strategija potrebnih za uspjeh u 3D tisku. Odabir pravog pilot programa važan je za buduće financiranje i upravljanje. Pilot projekti također će postaviti temelje za novi lanac opskrbe pričuvnih dijelova. Izvršavanje cjelovitog programa za tiskanje pričuvnih dijelova pretvorit će se u proizvodnju i distribuciju rezervnih dijelova. Kao takav, zahtijevat će detaljnu mapu puta i poseban izvršni tim.



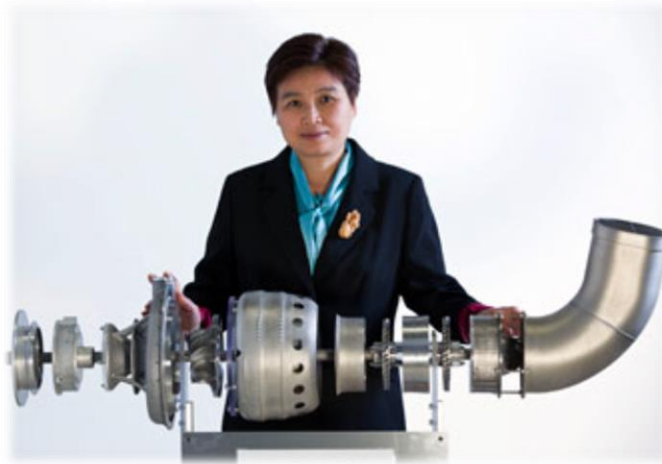
Slika 29. Plan za uspješno implementiranje 3D tehnologije [3]

3.4. PRIMJENA U POMORSKOJ INDUSTRIJI

Snaga i dodatna vrijednost 3D ispisa jesu:

- ✓ dobivanje upravo onog što se projektira,
- ✓ izrada šupljina,
- ✓ uštede na masi i otpadu,
- ✓ uređaji sastavljeni iz jednog komada,
- ✓ kompleksna geometrija,
- ✓ brzi kalupi sa šupljinama,
- ✓ izrađeni dijelovi po mjeri,
- ✓ izrada pričuvnih dijelova točno kad su potrebni,
- ✓ trenutni popravak,
- ✓ 3D keramike za tiskanje,
- ✓ brži razvoj proizvoda, izrada prototipova,
- ✓ bolji proizvodi, više i lakše ispitivanja proizvoda.

Sadašnja 3D tehnologija dostupna je samo za proizvodnju pomoćnih komponenti brodova, a posebno komponenti i rezervnih dijelova za pumpe, ventile, izmjenjivače topline, motore, propelere i katalizatore. Fotografija prikazuje prvi 3D mlazni motor koji zapravo radi. [4]



Slika 30. Mlazni motor izrađen 3D tehnologijom tiska [4]

3D ispis je konkurentan kada postoji zahtjev za visok stupanj prilagodbe i složeni nacrt, što dovodi do više cijene komponente, no ujedno daje na vrijednosti zbog poboljšane izvedbe. Hitnost isporuke također doprinosi ovoj tehnologiji te, kao što je već prethodno navedeno, mogućnost sastavljanja mnogih komponenti u jednu cjelinu. [4]

Naravno, lakše je 3D tiskati iz digitalnih datoteka nego 3D skeniranjem zato što je 3D skeniranje kompleksno i nije precizno kao nacrt. Implementiranjem 3D tiska na brodu, pojednostavilo bi se skladište digitalizacijom pričuvnih dijelova. Pričuvne dijelove bi se pohranilo u bazu podataka koja bi se koristila za čuvanje modela pričuvnih dijelova te bi ih se potom tiskalo 3D pisačem na brodu. 3D tisak pričuvnih dijelova na brodu ima nekoliko prednosti:

- ✓ Nema skladišta pričuvnih dijelova na brodu.
- ✓ Nema čekanja da vitalni pričuvni dijelovi odgađaju rad na brodu i plovnost broda.

Razmišljanje ide u smjeru da su pričuvni dijelovi bolji od izvornih jer su ažurirani. Budući da se rezolucija i greške na različitim 3D pisačima drastično smanjuju i prigušuju, ispravci iz tih iskrivljenja trebaju biti uključeni u datoteku modela te ga poboljšati.

Sprej 3D pisači mogu dodati materijal na površinu postojećih komponenata. Na taj se način postojeće komponente mogu popraviti te ujedno poboljšati. Nove površine koje nanosimo na mjesta predviđena gdje se elementi troše i habaju. Sprej 3D pisač može biti vrijedan alat u radionici na brodu i rješenje mnogih problema. [4]

Ključna ograničenja 3D pisača, osobito FDM pisača, očituju se u tome što su vrlo spori u usporedbi s industrijskim procesima, ali još uvijek brzi u usporedbi s ručno izrađenim komponentama. Trošak polimernog materijala kreće se u rasponu od 100 \$ / kg. Izravni metalni tiskarski materijal košta 300-600 \$ / kg. Veličina jednostrukog komada ograničena je veličinom pisača, koja je često u rasponu od 30 x 30 x 30 cm. Snaga FDM 3D ispisa manja je od krutih materijala, a horizontalni nadvojnici trebaju podršku strukture, što zahtijeva više materijala i, u konačnici, više vremena za izradu elementa. [4]



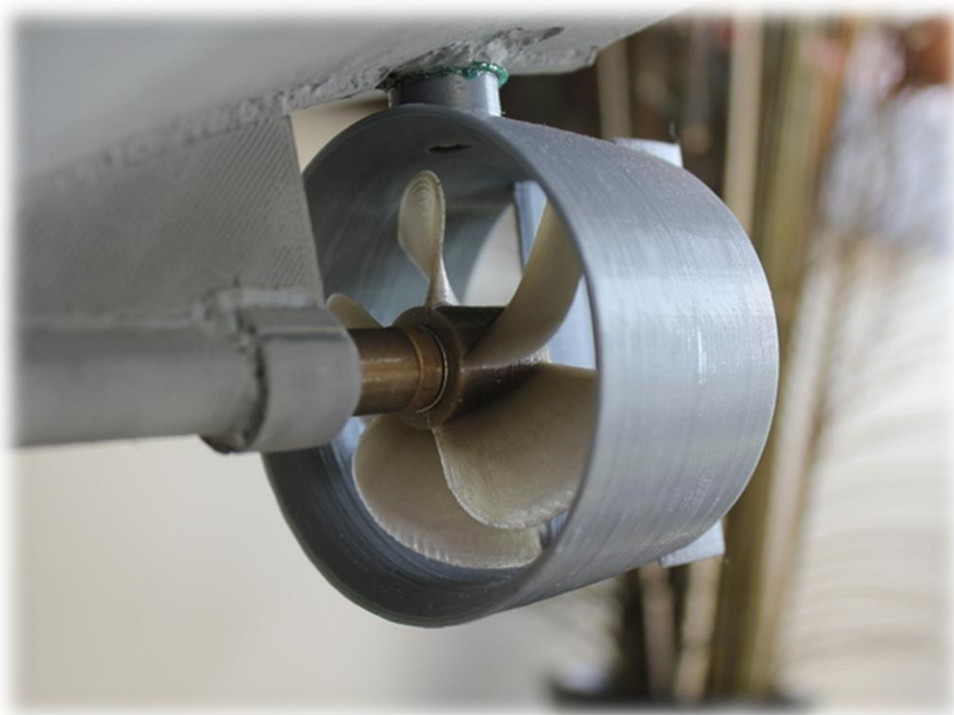
Slika 31. Veliki Voxeljet 3D pisač koji koristi pijesak za stvaranje modela [4]

Debljina slojeva može se kontrolirati, što utječe na težinu i snagu elementa. Veličina 3D pisača ovisi o veličini komponenti koje se može izraditi iz jednog komada. Međutim, i s manjim 3D pisačem moguće je tiskati manje dijelove koje će se kasnije spojiti u jedan veći. Može se, stoga, zaključiti da je u ovom slučaju veličina bitna. [4]

Projekt pod nazivom „3D tiskanje pomorskih rezervnih dijelova“ konzorcija od 27 pomorskih tvrtki utemeljili su „Innovation Quarters“, „Havenbedrijf Rotterdam“, „RDM Makerspace“ i „AEGIR-Marine“ kako bi podijelili svoju stručnost. [4]

Kineska industrija brodogradnje „Industry Corporation“ (CSIC) te državni brodograditelj najavili su da je postignut napredak u 3D tisku. Kako bi nastavio s razvojem 3D tehnologije ispisa, CSIC će proširiti bazu proizvodnje materijala u Kunmingu i uspostaviti prototipni tehnološki centar u provinciji Yunnan. [4]

Podružnica Maritime Grupe Norveške osnovala je partnerstvo s „3Doscoved“ iz Chicaga, vodeće platforme za industrijsku 3D tiskaru, za isporuku 3D tiskanih dijelova u brodarskoj industriji, brodsko popravljjanje i retrofit servis. Partnerstvo će omogućiti 3D skeniranje dijelova kako bi izvor mnogih dijelova potrebnih za nove i naknadno opremljene instalacije opreme na plovilima / brodovima za krstarenje mogli biti tiskani na više mjesta bez odgađanja. [4]



Slika 32. Propeler izrađen 3D tehnologijom tiska [4]

3.4.1. 3D Hubs platforma

3D Hub najveća su svjetska mreža proizvodnih usluga. Platforma nudi 3D ispis, „CNC Machining“ i „Injection Molding“ te upravlja mrežom od 7.365 proizvodnih partnera. To je zapravo „Airbnb“ 3D ispisa koji uzima 15% provizije svakog 3D ispisa. Utemeljen je ponajprije da se decentraliziraju velike tvrtke te lakše obave manji poslovi. Upravo je ovakav model jedan od rješenja za brodersku industriju koja svoje flote ima diljem svijeta u svakom trenutku i bitna im je brzina dostave, odnosno mjesto gdje će se krajnji proizvod izraditi. Od 2013. godine „3DHubs“ je povezo 30.000 privatnih 3D pisaca na globalnoj razini u jednu online platformu i učinio ih lokalno dostupnim. Danas 3D Hub nudi uslugu pristupa 3D ispisu na udaljenosti od 10km (u prosjeku) za više od milijardu ljudi.

Upravo preko ove platforme izrađen je jedan od modela koji će kasnije biti predstavljen u ovom diplomskom radu. Brz, jednostavan i relativno jeftin pristup.



Slika 33. Globalna mapa 3D hub partnera

Korištenje ovakve usluge zapravo je vrlo jednostavno: model se dostavi njihovoj središnjici gdje stručnjak, u roku od nekoliko minuta, ocijeni koliko je zahtijevan te se dostavi povratna informacija o modelu. Zatim se u suradnji sa njima dogovori materijal izrade iz odrednica koje sami zadajemo. Nakon toga, prema izvedbi i odabranom materijalu, dostavlja se popis najbližih 3D hub radionica koje su osposobljene za takav posao i u roku od par sati već je moguće imati gotov objekt. Platforma garantira kvalitetu izrade te omogućuje dostavu na kućna vrata. Svakim danom kvaliteta raste i podižu se granice i zahtjevi koje 3D hub radionice moraju ispunjavati kako bi ostale konkurentne i isplative pa zbog toga trenutno rangiraju kvalitetu radionica kako bi poboljšali kvalitetu i brzinu isporuke.

3.5. UTJECAJ TISKANJA PRIČUVNIH DIJELOVA NA DOSTUPNOST BRODSKIH SUSTAVA

U ovom poglavlju definirat će se temeljni pojmovi kao što su: pouzdanost, funkcija intenziteta otkaza i sl. To su pojmovi vezani uz pouzdanost sustava. Ako se ispituje n sustava, nakon određenog vremena t , neki nisu otkazali (n_1), a neki sustavi su otkazali (n_2). Funkcija pouzdanosti može se izraziti i kao;

$$R(t) = \frac{n_1(t)}{n} = \frac{n_1(t)}{n_1(t)+n_2(t)} \quad (1)$$

Jednadžba (1) daje vjerojatnost bez otkaznog rada bilo kojeg od n sustava u toku vremena t . Funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ se definira preko distribucije životnog ciklusa sustava, $f(t)$. [10]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2)$$

Jednadžba (2) pokazuje kako se u toku vremena mijenja intenzitet otkaza nekog sustava. Vrijednost λ je, uz funkciju gustoće otkaza i funkciju pouzdanosti, treća karakteristika pouzdanosti. Očekivano vrijeme bez otkaznog rada sustava, T_{SR} , prikazano je sljedećim izrazom:

$$T_{SR} = \int R(t) dt \quad (3)$$

Ako se promatrani sustav održava ili popravlja, tj. u slučaju takozvanih popravljivih sustava, očekivano vrijeme bez otkaznog rada označava se kao srednje vrijeme između otkaza ($MTBF$ – eng. *Mean Time Between Failure*). Raspoloživost sustava definira se ovim izrazom:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (4)$$

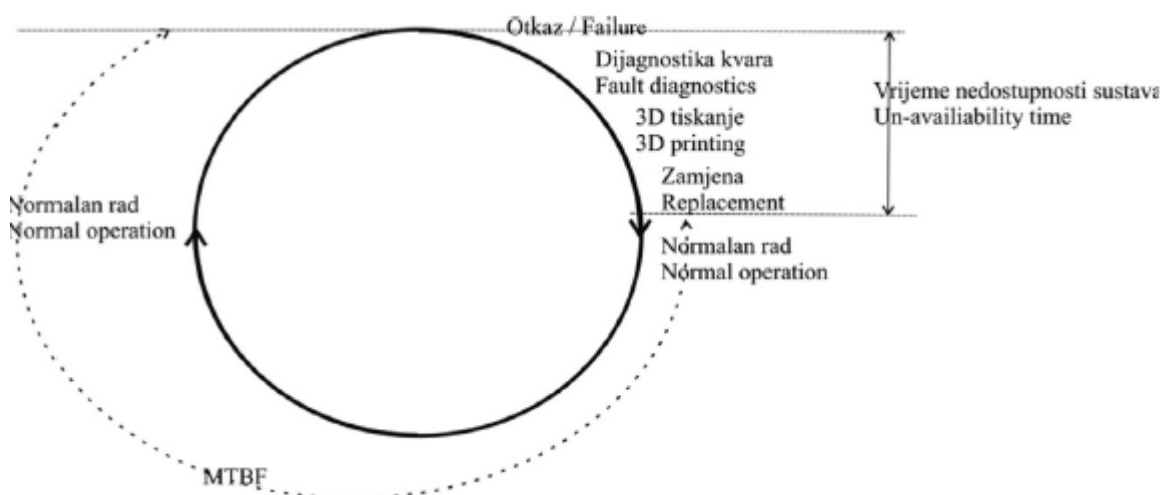
gdje je $MTTR$ srednje vrijeme popravka (eng. *Mean Time To Repair*). Iz (4) slijedi da nije moguće postići stopostotnu raspoloživost sustava jer je prva derivacija jednaka nuli samo ako je $MTBF = 0$, što ne odgovara stvarnosti i ne bi imalo smisla. Dakle, $A \rightarrow 1$ kada je $MTTR \rightarrow 0$. Često se raspoloživost prikazuje i na sljedeći način:

$$A = \frac{\mu}{\mu+\lambda} \quad (5)$$

Gdje je : - λ intenzitet otkaza, definiran s : $\lambda = \frac{1}{MTBF}$ (6)

- μ intenzitet popravka definiran s: $\mu = \frac{1}{MTTR}$ (7)

Svaka komponenta, sustav i sam brod može se prikazati kroz pouzdanost rada i raspoloživost u određenom trenutku. Kada se neka komponenta pokvari, potrebno je dijagnostičkim postupkom lokalizirati kvar te promijeniti komponentu pričuvnom, ako na brodu postoji odgovarajući dio. U slučaju da ne postoji, potrebno ga je dostaviti s kopna ili drugim brodom ili zračnim putem. To iziskuje puno više vremena. Cijelo to vrijeme, sustav ili podsustav je nedostupan, tj. nije raspoloživ za rad. Uvođenjem 3D tehnologije tiska više nije potrebno nositi pričuvne dijelove na pučinu, nego se oni tiskaju prema potrebi. Pri tom postoje dva modela: da su sve brodske komponente na tvrdom disku računala ili da se model za tiskanje šalje s kopna satelitskom vezom ili nekim drugim komunikacijskim kanalom. Prvi je model pouzdaniji jer se nije potrebno oslanjati na mogućnosti komunikacije u određenom trenutku. Drugi model prihvatljiviji je sa stanovišta patentnih prava jer se može plaćati po broju primitaka datoteka. I jedan i drugi model shematski izgledaju kao na slici.



Slika 34. Funkcioniranje broda uz 3D tiskanje dijelova [10]

Dakle, 3D tiskanje utječe na raspoloživost sustava – kada se pokvari, treba određeno vrijeme da se izradak otisne uz vrijeme potrebno da se u računalu pronađe shema izratka i potom ugradi. Postavlja se pitanje isplativosti korištenja 3D tehnologije u odnosu prema načinu zamjene dijelova kojima se trenutno koristi, a to je da se skladište. Parametri koji se svakako uzimaju u razmatranje su brzina izrade izratka preko 3D tehnologije i, prije svega, kvaliteta učinjenog izratka. U svakom slučaju, korištenjem 3D tehnologije izrade uradaka značajno se poboljšava MTTR parametar. Razvojem i unaprjeđivanjem 3D tehnologije tiskanja MTTR parametar će se dodatno poboljšavati. Međutim, za slučaj dobrog planiranja nabavke i dostave pričuvnih dijelova, ne bi trebalo biti utjecaja na funkcioniranje broda ako

su potrebni dijelovi na brodu zato što 3D tehnologija otiska izratka još uvijek nije što se tiče kvalitete identična izracima urađenim preko CNC i tokarskih strojeva. Kako brod nije moguće opskrbiti svim dijelovima, može se samo statističkim postupcima predvidjeti što bi moglo biti potrebno na sljedećem putovanju. U slučaju lošeg planiranja ili odstupanja od statistike, 3D tehnologija povećava pouzdanost i raspoloživost sustava. Prednost je u tome da se uvijek ima potreban pričuvni dio. Da bi se stekao dojam o utjecaju 3D tehnologije tiskanja, hipotetski će se razmotriti problem da je za promjenu nekog dijela i njegovo tiskanje potrebno vrijeme od jednog sata. Znači da dostava ili traženje u skladištu nekog dijela iznosi, hipotetski, MTTR manje jedan sat. Ovo je uzeto samo kao primjer da se može promatrati utjecaj 3D tiskanja na raspoloživost sustava. Prvo će se proračunati za tip broda C, element klizajući pogonski blok, stanice 1 i 5. Podaci su:

MTBF = 822 sata, MTTR 8,3 sata. Uvrštavajući u (4) slijedi:

$$A_{\text{bez3D}} = \frac{822}{822+8,3} = 0,9900036131518728$$

$$A_{\text{sa3D}} = \frac{822}{822+1} = 0,9987849331713244$$

Što je razlika od 0,87813200194964% ,

Za FAS (engl. *fueling at sea*) upravljačku stanicu broj 4, MTBF je 52000 sati, a MTTR je 2,1 sat te iz (4) slijedi:

$$A_{\text{bez3D}} = \frac{52000}{52000+2,1} = 0,9999596170154667$$

$$A_{\text{sa3D}} = \frac{52000}{52000+1} = 0,9999807696005846$$

što je 0,00211519903793% poboljšanja raspoloživosti.

Za sustav brodskog dizala nosivosti 5443,1 kg [27] MTBF je 17680, a MTTR je 5,6 sati. Prema (4) slijedi:

$$A_{\text{bez3D}} = \frac{17680}{17680+5,6} = 0,9996833582123309$$

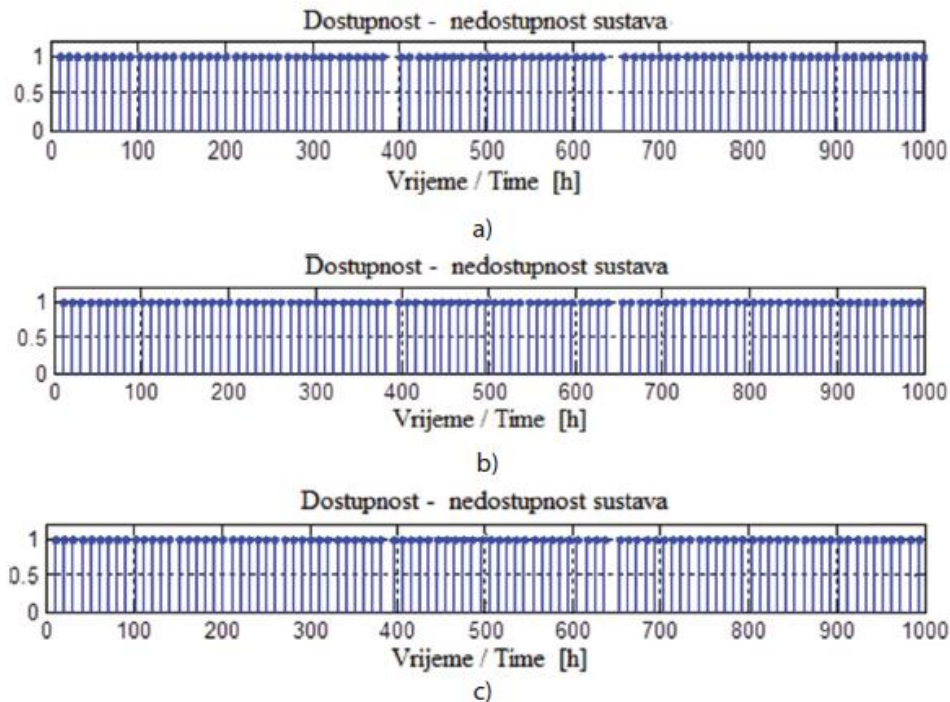
$$A_{\text{sa3D}} = \frac{17680}{17680+1} = 0,99994342113002658$$

što je 0,026% poboljšanja raspoloživosti.

S aspekta raspoloživosti sustava, male su razlike, ako je odgovarajućeg dijela bilo na brodu, što ne mora biti slučaj. Što je manji MTBF, to je je veća raspoloživost sustava s obzirom na primjenu 3D tehnologije tiskanja. Međutim, to nije dobro, jer bi se u tom slučaju najbolji rezultat postigao kada bi neka komponenta stalno bila na popravku, a to znači da ne bi radila. Kompanije se pozivaju na ekonomske pogodnosti, što nije tema ovog rada. [8]

3.5.1. Primjer simulacije

Za svrhu simulacije pretpostavit će se da razmatrani brodski sustav može biti u stanju rada ili kvara. Stanje sustava je izlazni signal (1 – radi, 0 – kvar). Ulaz u simulaciju je podatak o učestalosti otkaza i trajanje kvara. Iz toga se računa potrebno vrijeme za popravak. S obzirom da nije uvijek moguće ostvariti potpuno identično vrijeme popravka, potrebno je definirati raspon između minimalnog vremena popravka i maksimalnog vremena. [8]



Slika 35. a) pri dostavi dijelova zrakom, b) uz 3D tiskanje umjesto dostave zrakom, c) dostupnost sustava ako je pričuvni dio u brodskom skladištu [8]

Ako se pretpostavi da se kvar dogodio na pučini te da dio treba dostaviti zračnom linijom, u vrijeme popravka treba uračunati i vrijeme dostave te ukrcaj i iskrcaj dijela koji se mijenja. Ako se pretpostavi da se kvar dogodio na 7 sati leta s ukrcajem i iskrcajem te da za promjenu dijela, dijagnostiku i upućivanje u rad treba 1-5 sati, tad se dobiva da je sustav nedostupan u vremenskom intervalu od 8 do 12 sati (a). [8]

Ako je na brodu 3D štampač te ako za nalaženje, učitavanje i tiskanje treba 1 sat, a 1 do 5 sati traje promjena dijela, tada je ukupno sustav nedostupan u vremenskom intervalu od 2 do 6 sati. Rezultat za taj slučaj prikazan je na slici (b). [8]

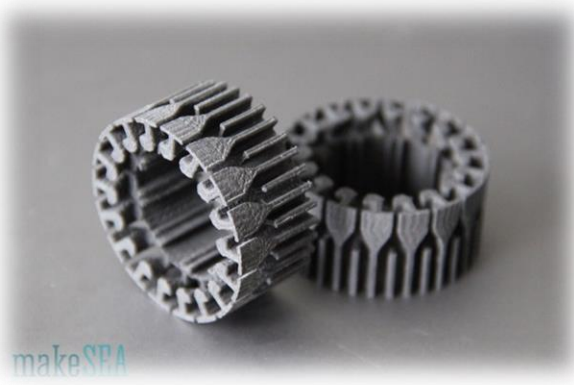
Ako se dio, koji se treba promijeniti, nalazi na brodu i potrebno je 0,5 sati da se pronađe, tada je potrebno 1,5 do 5,5 sati da se sustav osposobi za rad. Rezultat tog slučaja je na Slici (c). [8]

Graf na Slici 35. uzorkovan je u vremenu. Kad je sustav dostupan, graf prikazuje 1. Ako se na mjestu uzorkovanja nalazi praznina, tada je sustav nedostupan (dostupnost je jednaka nuli). Može se primijetiti da je pod simulacijskim pretpostavkama brodski sustav najdostupniji ako postoji na brodu pričuvni dio, što je bilo logično za očekivati.

Razvojem 3D tehnologije tiskanja i materijala kojima se koristi za tiskanje, 3D tehnologija se primjenjuje u sve više područja. Sa stajališta tehnologije prometa i pomorstva, 3D tehnologija tiskanja je primjenjiva i poboljšava učinkovitost prometnih i brodskih sustava. [8]

Što se tiče primjene 3D tehnologije tiskanja u pomorstvu, konkretno brodovima svih vrsti, može se pretpostaviti da će sve više brodova biti opremljeno 3D tiskačima, jer ova tehnologija predstavlja nadogradnju i poboljšanje pri zamjeni dotrajalih i neispravnih dijelova na brodovima. Trenutna praksa je da se zamjenski dijelovi skladište na brodovima, tako da postoji dosta redundantnosti i eventualnih prostornih problema pri skladištenju. U novoj tehnologiji, početna prednost je da će svi nacrti potrebitih dijelova biti pohranjeni na računalu ili na nekome mediju za pohranu podataka, čime se značajno oslobađa prostor na brodovima koji se može primijeniti u druge svrhe. [8]

Iako su istraživanja pokazala da prednosti ove tehnologije, ako se govori o pouzdanosti i robusnosti sustava, trenutno nisu veće, čak zbog trenutnog stanja materijala kojima se koristi pri 3D tiskanju, a koji su sigurno lošije kvalitete od zamjenskih dijelova napravljenih u postupcima obrade metala tokarenjem ili nekim višim metodama kao što su CNC strojevi, brz će napredak ove tehnologije i to uskoro zamijeniti. [8]



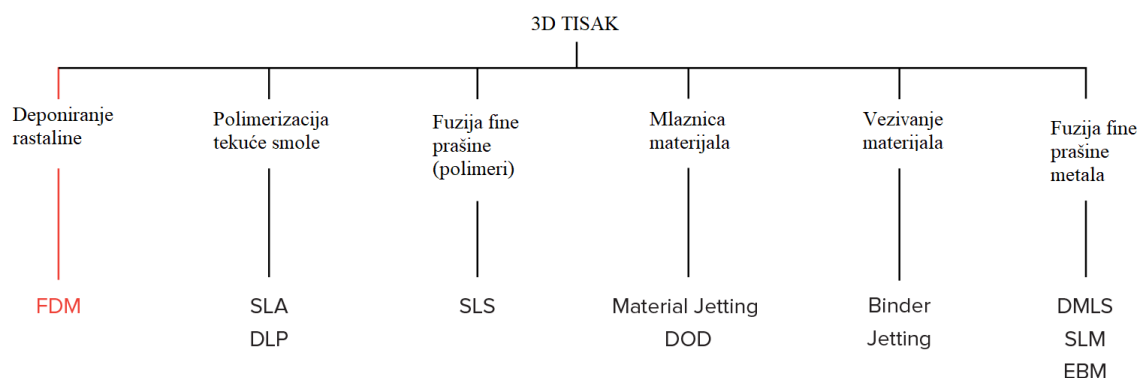
Slika 36. Stator elektromotora

4. TEHNOLOGIJA TALOŽNOG OČVRŠĆIVANJA

Odabir pravog 3D materijala za ispis projekta vrlo je važno. Koji je materijal najprikladniji uvelike ovisi o konkretnom slučaju korištenja. U ovom poglavlju opisat će se najčešće korišteni 3D materijali za ispis, njihova osnovna svojstva, prednosti i mane, te gdje ih je najbolje koristiti.

4.1. ODABIR PROCESA IZRADE PREMA MATERIJALU

Najpopularniji materijal za 3D ispis, odnosno onaj najčešće korišten, je plastika za prototipove, iz razloga što je najjeftiniji materijal i koristi se u najjednostavnijem obliku 3D ispisa dostupnog širokom tržištu i svakodnevnoj upotrebi. To je čvrsta plastika za brz i jeftin ispis, tolerancije +/- 1mm. Drugi na popisu materijala je smola visokog stupnja detalja, korištena kod kompliciranih dizajna objekata, glatke završne obrade. SLS najlon korišten kod dizajna prototipova ali i za gotove potpuno funkcionalne objekte. Zatim taj isti najlon pojačan vlaknima, koji se koristi za objekte čvrste kao aluminij, za cijenu plastike. Čvrsta neprozirna plastika za izradu realističnih objekata izvrsno obrađenih detalja visoke točnosti. Također se koristi plastika nalik gumi, kod koje se pravilnim odabirom kontrolira rastezljivost materijala. Prozirna plastika koristi se kod objekata gdje je to svojstvo zaista potrebno. Pijesak u raznim bojama koristi se kod izrade maketa i konstrukcija kod kojih je bitan vizualni efekt, a ne funkcionalnost. Metali se, naravno, koriste kao najkvalitetniji odabir za objekte krajnje upotrebe, čime se i teži u budućnosti da 3D tehnologija bude prva i jedina industrija koristeći sve vrste materijala. [9]

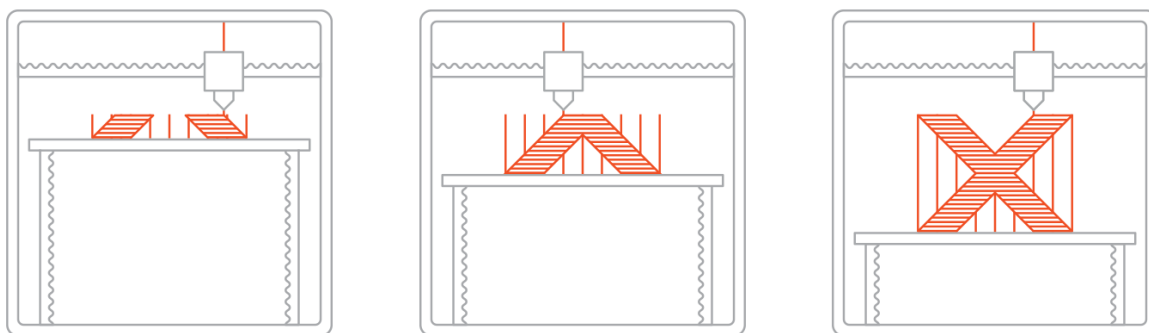


Slika 37. Podjela tehnologija prema procesima izrade

4.2. MODELIRANJE TALOŽNIM OČVRŠĆIVANJEM

Modeliranje taložnim očvršćivanjem (engl. *Fused Deposition Modeling* – FDM) ili deponiranjem rastaline (engl. *Fused Fabmentation Filament* - FFF) je proces aditivne proizvodnje koji pripada obitelji materijala istiskivanja ili deponiranja (engl. *extruder*). Kod FDM-a objekt se gradi selektivnim odlaganjem rastopljenog materijala u unaprijed određenom sloju po sloju. Materijali koji se koriste su termoplastični polimeri i dolaze u obliku vlakna. FDM je najčešće korištena tehnologija 3D tiska te ona predstavlja najveću instaliranu bazu 3D pisača na globalnoj razini, a često je i prva tehnologija s kojom se ljudi upoznaju pri odabiru 3D tehnologije izrade. U ovom poglavlju prikazani su osnovni principi i ključni aspekti tehnologije.

Dizajner bi trebao imati na umu mogućnosti i ograničenja tehnologije pri izradi modela s FDM-om jer će mu to pomoći u postizanju boljih rezultat izrade modela.



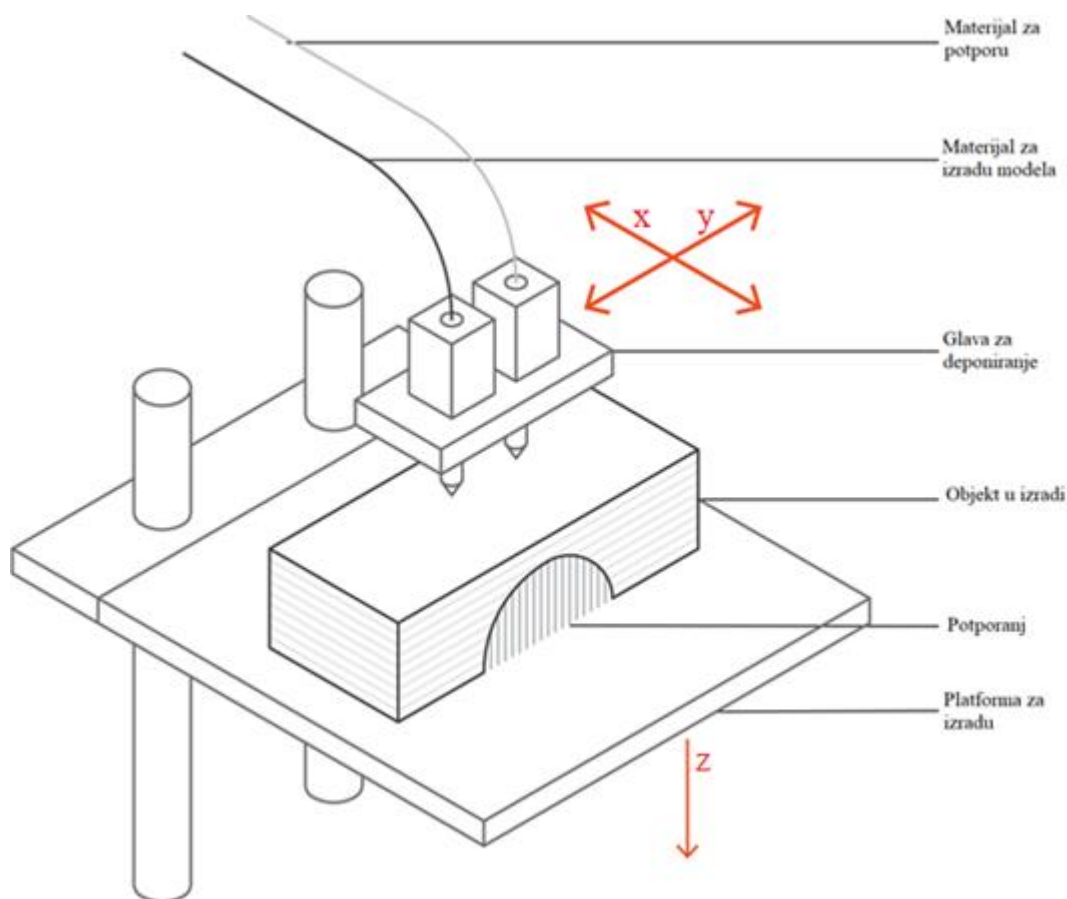
Slika 38. Modeliranje taložnim očvršćivanjem [10]

4.2.1. Načelo rada FDM pisača

Na pisač se najprije stavlja kolut termoplastične niti. Nakon što je mlaznica dostigla željenu temperaturu, vlakna se dovode na ekstruzijsku glavu, na mlaznicu, gdje se ona tope.

Ekstruzijska glava pričvršćena je na tro osi sustav koji omogućuje da se pomakne u smjeru X, Y i Z, vidljivo na slici 33. Fuzionirani materijal ekstrudiran je u tankim nitima i odložen sloj po sloj na unaprijed određenim mjestima, gdje se hladi i učvršćuje. Ponekad se hlađenje materijala ubrzava pomoću ventilatora za hlađenje pričvršćenog na ekstruzijsku glavu koji se može kontrolirati također izvorno - iz programske datoteke modela. [10]

Za popunjavanje područja potrebno je više prolaza (slično bojanju pravokutnika s markerom). Kad se sloj završi, platforma za gradnju se pomiče prema dolje (ili u drugim postavkama stroja, glava za ekstruziju pomiče se prema gore) i položen je novi sloj. Ovaj se postupak ponavlja dok se dio modela ne završi.



Slika 39. Detaljan opis načina rada FDM-a [10]

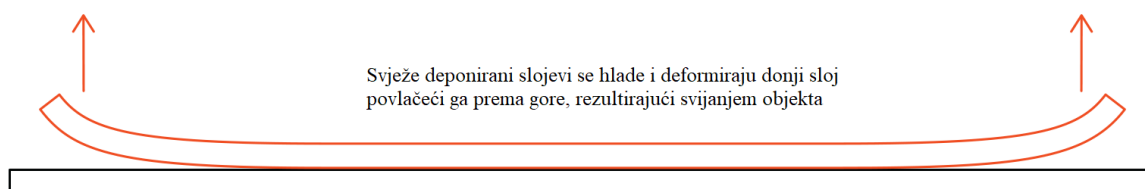
4.2.2. Karakteristike FDM pisača

Većina FDM sustava omogućuju podešavanje nekoliko parametara procesa, uključujući temperaturu i mlaznice i podloge, brzinu tiskanja, visinu sloja i brzinu ventilatora. Te su stavke općenito postavljene od strane projektanta, kako bi operateru olakšali posao. Ono što je važno iz perspektive tehničara za modeliranje je veličina gradnje i visina slojeva. Dostupna veličina 3D pisača obično je 200 x 200 x 200 mm, dok za industrijske strojeve to može biti jednako 1000 x 1000 x 1000 mm. Ako je stolni stroj preferiran, veliki model može se slomiti na manje dijelove, a zatim sastaviti, što rezultira smanjenjem troškova skupljeg i većeg stroja, no ujedno smanjuje i kvalitetu modela. [10]

Tipična visina sloja korištena u FDM-u varira između 50 i 400 mikrona. Manja visina sloja proizvodi glatke dijelove i preciznije bilježi zakrivljene geometrije, dok veća visina stvara dijelove brže i po nižoj cijeni. Najčešće se koristi visina sloja od 200 mikrona. [10]

4.2.3. Problem savijanja

Savijanje je jedan od najčešćih nedostataka u FDM-u. Kada se ekstrudirani materijal hladi tijekom skrućivanja, njegove se dimenzije smanjuju. Kako se različiti dijelovi ispisa hlade različitim brzinama, njihove dimenzije također se mijenjaju pri različitim brzinama. Diferencijalno hlađenje uzrokuje nakupljanje unutarnjih naprezanja koje povlače podlogu prema gore, uzrokujući njegovo deformiranje, što se vidi na slici 40. Sa tehnološkog gledišta, savijanje se može spriječiti detaljnijim nadzorom temperature FDM sustava (npr. gradnje platforma i komore) i povećanjem adhezije između dijela i platforme za gradnju. Izbor tehničara za modeliranje također može smanjiti vjerojatnost savijanja. Velika ravna područja (misli se na pravokutnu kutiju) sklonija su savijanju i treba ih izbjegavati kad god je to moguće. Tanke isturene značajke (npr. zubima vilice) također su sklone deformiranju. U tom slučaju, savijanje se može izbjeći dodavanjem potpornja gdje se gubi na materijalu, primjerice, pravokutnik debljine 200 mikrona, kako bi se povećala površina koja dodiruje platformu za gradnju. Oštri su kutovi češće deformirani nego zaobljeni oblici, tako da je dodavanje filamenta potpore kod dizajna objekta svakako dobra praksa. Različiti materijali osjetljiviji su na savijanje: ABS je općenito osjetljiviji na savijanje u usporedbi s PLA ili PETG zbog veće temperature staklastog prijelaza i relativno visokog koeficijenta toplinske ekspanzije. [9]

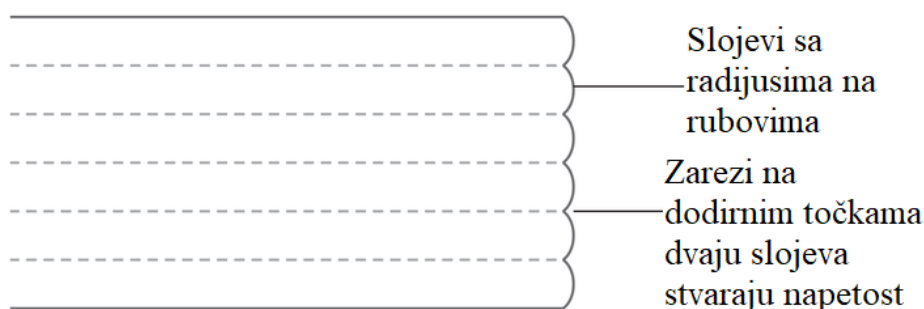


Slika 40. Deformacija objekta prilikom FDM izrade [10]

4.2.4. Problem prijanjanja

Dobro prijanjanje između položenih slojeva vrlo je važno za FDM tehnologiju 3D tiska. Kada se rastopljeni termoplasti deponira kroz mlaznicu, on se pritisne na prethodni sloj. Visoka temperatura i tlak prijanjaju površinu prethodnog sloja i omogućuju povezivanje novog sloja s prethodno tiskanim dijelom. Snaga veze između različitih slojeva uvijek je niža od osnovne čvrstoće materijala. To znači da su FDM dijelovi inherentno anizotropni, odnosno njihova čvrstoća na z-osi uvijek je manja od njihove snage u XY ravnini. Iz tog

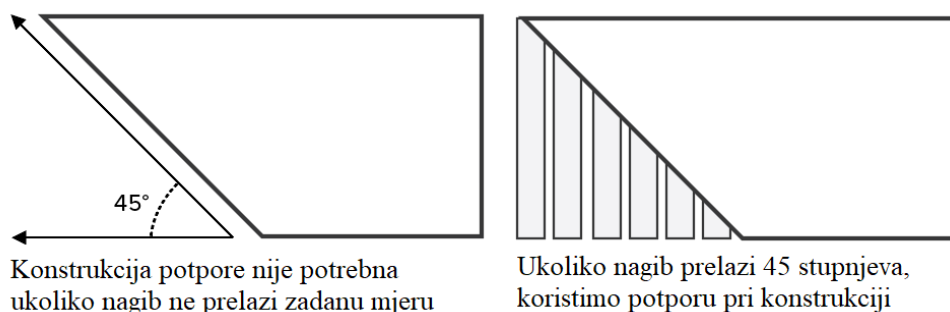
razloga važno je zadržati orijentaciju usmjerenja pri izradi dijelova za FDM. Na primjer, vlačne testne komade ispisane vodoravno u ABS-u na 50% ispunjavanju uspoređene su s ispitnim komadima otisnutim okomito i nađeno je da imaju skoro 4 puta veću čvrstoću rastezanja u smjerovima x i y u usporedbi s smjerom z (17,0 MPa u usporedbi s 4,4 MPa) i izduženih gotovo 10 puta više prije razbijanja (4,8% u usporedbi s 0,5%). Štoviše, budući da je rastaljen materijal pritisnut na prethodni sloj, njegov oblik je deformiran na ovalni. To znači da će dijelovi FDM-a uvijek imati valovitu površinu, čak i za nisku visinu sloja, te da se male rupe ili niti, moraju naknadno obraditi nakon ispisa. [10]



Slika 41. Prikaz slojevitog načina ispisa kod FDM tehnologije 3D tiska [10]

4.2.5. Struktura potpore

Struktura potpore neophodna je za stvaranje geometrijskih oblika s presjecima u FDM-u. Topljeni termoplastični materijal ne može se nanijeti kao tanki sloj u zraku. Iz tog razloga, neke geometrije zahtijevaju strukturu potpore. Površine tiskane na nosaču obično imaju manju površinsku kvalitetu od ostalih dijelova. Iz tog razloga, preporučuje se da je dio dizajniran na takav način da se minimizira potreba za potporom. [10]



Slika 42. Konstrukcija potpore [10]

Potporanj se obično tiska u istom materijalu kao i dio. Postoje i materijali za konstrukciju potpore koji se otapaju u tekućini, ali se uglavnom koriste u visokokvalitetnim stolnim ili industrijskim FDM 3D pisačima. Tiskanje na otapajućim nosačima značajno poboljšava kvalitetu površine dijela, ali povećava ukupni trošak ispisa, budući da su potrebni posebni strojevi s dvostrukom ekstruzijom.

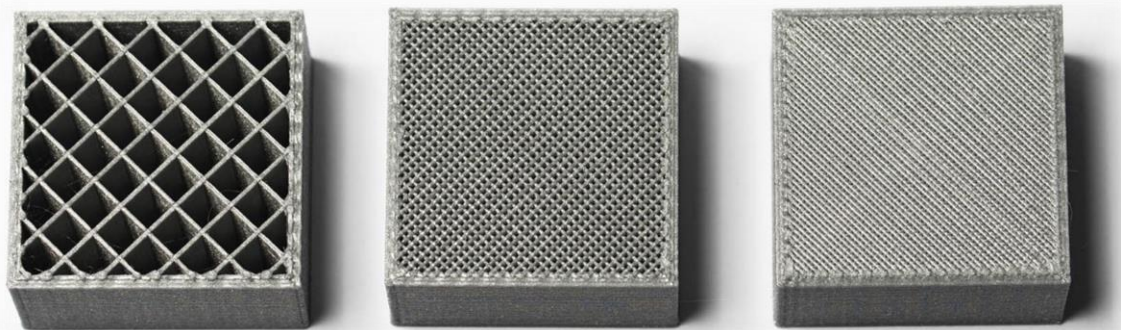


Slika 43. Primjer potrebe za konstrukcijom potpore [10]

4.2.6. Spajanje i šupljine

FDM dijelovi obično nisu tiskani da budu čvrsti i puni, kako bi se smanjilo vrijeme ispisa i sačuvao materijala. Vanjski je perimetar praćen pomoću nekoliko prolaza, zvanih ljuska, a unutrašnjost je ispunjena unutarnjom strukturom niske gustoće, nazvanom ispuna.

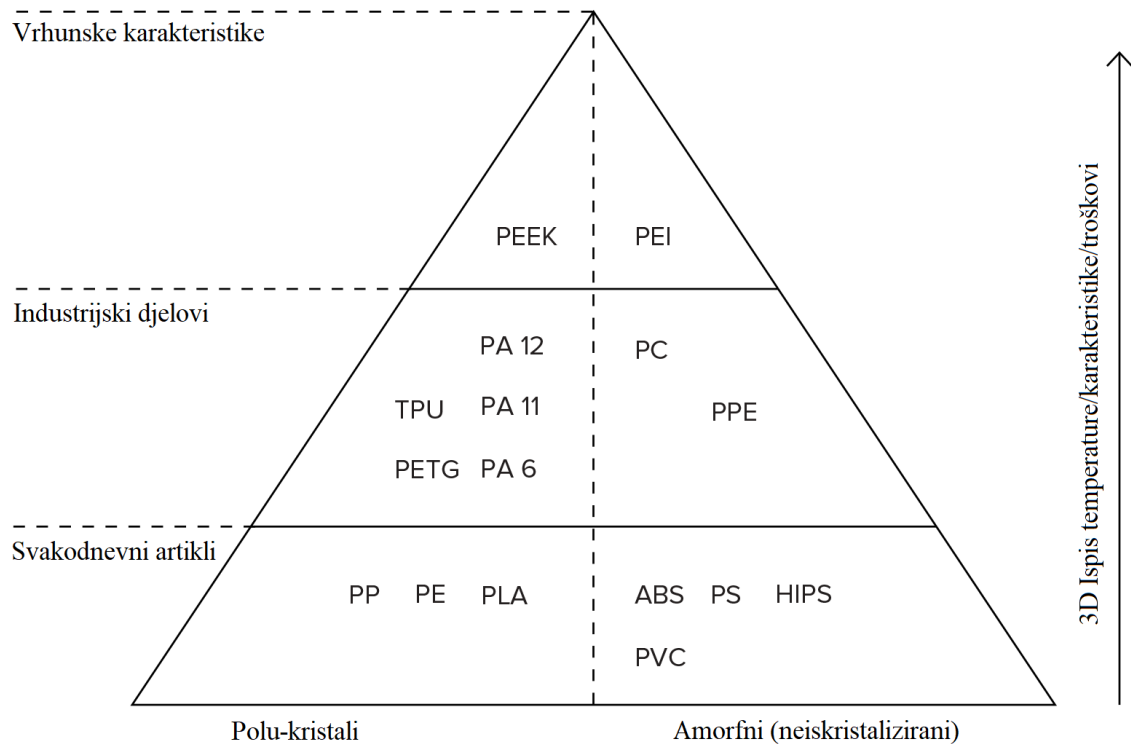
Spajanje i debljina ljuske utječu na snagu dijela koji se printa. Vodič za odabir najboljih parametara ljuske i ispune za FDM 3D ispis može se pronaći u katalozima. Za FDM pisače svakodnevne upotrebe, zadana je postavka 25% gustoće napunjenosti i debljina ljuske od 1 mm, što je dobar kompromis između snage i brzine za brze ispise. [10]



Slika 44. Različiti omjeri gustoće šupljina [10]

4.2.7. Zajednički FDM materijali

Jedna je od ključnih prednosti FDM-a širok raspon dostupnih materijala. Oni mogu biti u rasponu od termoplastike (kao što su PLA i ABS) do inženjerskih materijala kao što su PA, TPU i PETG i termoplastike visokih performansi kao što su PEEK i PEI. [10]



Slika 45. Piramida materijala termoplastike dostupne u FDM tehnologiji [10]

FDM dijelovi mogu se dovesti do razine s vrlo visokim standardom koristeći različite metode nakon obrade, kao što su brušenje i poliranje, premazivanje i bojanje, hladno zavarivanje, epoksidno premazivanje i metalni premazi i sl.. [10]

Sažetak FDM tehnologije 3D tiska:

- FDM može proizvesti prototipove i funkcionalne dijelove brzo i po niskoj cijeni iz širokog raspona termo plastičnih materijala.
- Tipična veličina gradnje FDM 3D pisača radne površine iznosi 200 x 200 x 200 mm. Industrijski strojevi imaju veću veličinu gradnje.
- Da bi se spriječilo savijanje, potrebno je izbjegavati velike ravne površine i dodati strukturu potpore u oštrim kutovima.
- FDM je inherentno anizotropna tehnika pa se ne preporučuje za mehanički kritične komponente.

Tablica 5. Karakteristike materijala FDM tehnologije [10]

<i>MATERIJAL</i>	<i>KARAKTERISTIKE</i>
ABS	+ dovoljna snaga i izdržljivost + temperaturna otpornost – veća vjerojatnost za savijanje
PLA	+ izvrstan vizualni efekt i izgled objekta + lagan za korištenje pri tiskanju – manja snaga na udarce
Nylon (PA)	+ velika snaga i izdržljivost + otporan na habanje i kemijski otporan – loša otpornost na vlagu
PETG	+ siguran i korištenju oko jela + dovoljno snažan materijal + lagan za korištenje u ispisu
TPU	+ veoma fleksibilan – težak za precizan ispis
PEI	+ izvrsna otpornost na težinu + izvrsna otpornost na vatru i kemikalije – velika cijena

Materijal koji se koristi utječe na mehanička svojstva i točnost tiskanog dijela, ali i na cijenu. Najčešći materijali FDM-a sažeti su u tablici 4.

Tablica 6. Sažetak FDM tehnologije [10]

Modeliranje taložnim očvršćivanjem	
materijali	Termoplasti (PLA,ABS,PETG,PC,PEI i sl.)
točnost	$\pm 0,5\%$ (donja granica $\pm 0,5$ mm) – kućni 3D pisač
izrade	$\pm 0,15\%$ (donja granica $\pm 0,2$ mm) – industrijski pisač
standardna veličina	200 x 200 x 200 mm – kućni 3D pisač
izrade objekta	1000 x 1000 x 1000 mm – industrijski
razlika u slojevima	50 to 400 mikrona
potpora	Nije uvijek potrebna

Ključne prednosti i nedostaci tehnologije:

- + FDM je najisplativiji način proizvodnje prilagođenih termoplastičnih dijelova i prototipova.
- + Vrijeme izrade FDM-a je kratko (što je brže od isporuke sljedećeg dana) zbog visoke dostupnosti tehnologije.
- + Dostupna je široka paleta termoplastičnih materijala, pogodnih za prototip i neke nekomercijalne funkcionalne primjene.
- FDM ima najnižu dimenzijsku točnost i razlučivost u usporedbi s ostalim 3D tehnologijama tiskanja, tako da nije prikladan za dijelove detaljima.
- FDM dijelovi imaju vidljive linije sloja, tako da je obrada potrebna za glatku završnu površinu.
- Slojni adhezijski mehanizam čini dijelove FDM inherentno anizotropnim.

FDM je najisplativiji način proizvodnje prilagođenih termoplastičnih dijelova i prototipova. Vrijeme dovršetka FDM-a relativno je kratko, što je brže od isporuke sljedećeg dana, a ujedno i jeftinije. Zbog visoke dostupnosti tehnologije, na raspolaganju je široka paleta termoplastičnih materijala, pogodnih za prototip i neke nekomercijalne funkcionalne primjene. FDM ima najnižu dimenzijsku točnost i razlučivost u usporedbi s ostalim 3D tehnologijama tiskanja, tako da nije prikladan za dijelove s previše detalja. FDM dijelovi imaju vidljive linije sloja pa je obrada nakon izrade potrebna za glatku završnicu. Veza između slojeva plastike je mehanička, a ne kemijska. U smjeru osi z (od radne površine na gore), 3D printani predmet je najranjiviji i najlakše puca, dok je u ostalim smjerovima puno čvršći. Potrebno je izbjegavati potporni materijal gdje je god moguće u cilju smanjenja troškova i vremena izrade. Tiskanje na većoj temperaturi omogućava bolje mehaničke veze između slojeva, no treba paziti na polimere koji se koriste jer neki ne podnose veće temperature. Također, manji objekti ne mogu se printati na velikoj temperaturi jer se sloj ne može dovoljno brzo ohladiti da bi se na njega naslonio novi sloj, što je pri izradi nekih od modela ovog rada bila i greška. Zato postoje optimalne temperature za svaki polimer, kao i hlađenje. Svaki 3D printani model koji je napravljen tako da se proizvodi 3D tehnologijom i za koji se koristio polimer zadovoljavajućih mehaničkih karakteristika jednako je uporaban i trajan, u nekim slučajevima i trajniji, kao isti takav proizvod napravljen tradicionalnom tehnologijom.

5. REZULTATI: 3D MODELI

Kao najpristupačnija 3D tehnologija ispisa na tržištu, (engl. *Fused Deposition Modeling* - FDM) tehnologija taložnog očvršćivanja odličan je izbor za brz i jeftin prototip koji se može koristiti za široku paletu aplikacija. To također može biti pogodno rješenje za funkcionalne dijelove, kao što su kućišta. Kao i sve metode proizvodnje, FDM ima neka ograničenja pri izradi na koja je nužno obratiti pažnju pri modeliranju.



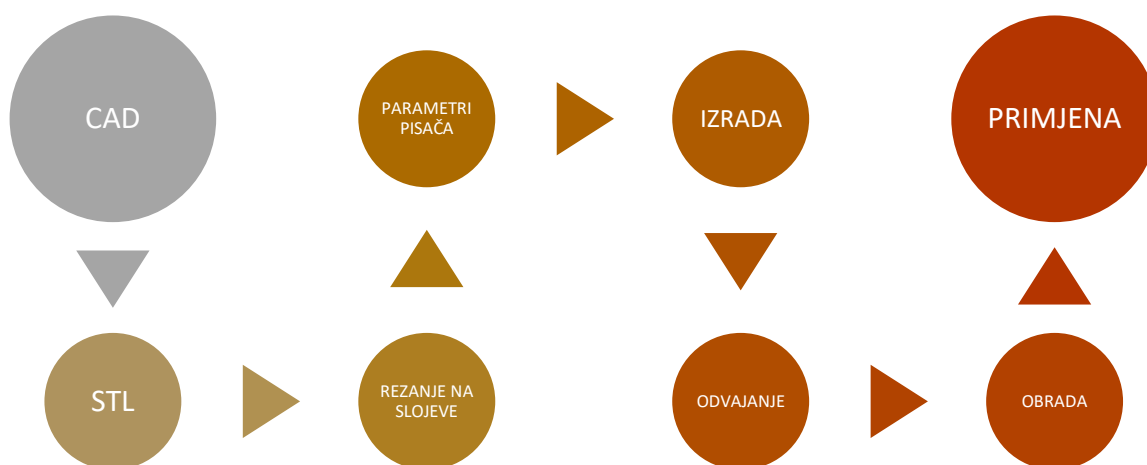
Slika 46. Modeli tiskani FDM tehnologijom 3D tiska

Na slici 46. vidljivi su neki od primjera 3D tiska FDM tehnologijom, a iz slike se da zaključiti koje su prednosti i nedostaci ovih modela. U pozadini se vidi moć 3D tiska u odnosu na neke standardne tehnologije izrade, gdje su „ležajevi“ tiskani na način da se ne mogu odvojiti od baze i dodiruju jedan drugog s točno određenim razmakom kako bi bili

pomični. U prvom planu slike vidljivi su loše projektirani vijci te funkcionalan i uporabljiv model cilindra brave električnog ormarića koji je primijenjen kao zamjena za original.

U svim postupcima proizvodnje modela, faze izrade su iste i sastoje se od:

- izrade CAD modela,
- pretvaranja CAD modela u STL datoteku,
- prebacivanja STL datoteke na pisač i virtualnog rezanja datoteke,
- podešavanja parametara pisača,
- izrade modela,
- odvajanja predmeta od pisača i uklanjanja strukture potpore,
- naknadne obrade ako je ona potrebna i
- primjene modela.



Slika 47. Faze izrade modela aditivnom tehnologijom

5.1. PROJEKTIRANJE MODELA FDM TEHNOLOGIJOM TISKA

Prilikom izrade modela treba uzeti u obzir koju tehnologiju koristiti. Ovisno o završnom izgledu i karakteristikama modela, bira se tehnologiju izrade. Zahtjevi komponente koja se izrađuje moraju biti jasni i obrazloženi. Postavljanjem zahtjeva pomoću „filtera“ prema slici 48., pronalazi se vrsta tehnologije kojom će se model najkvalitetnije

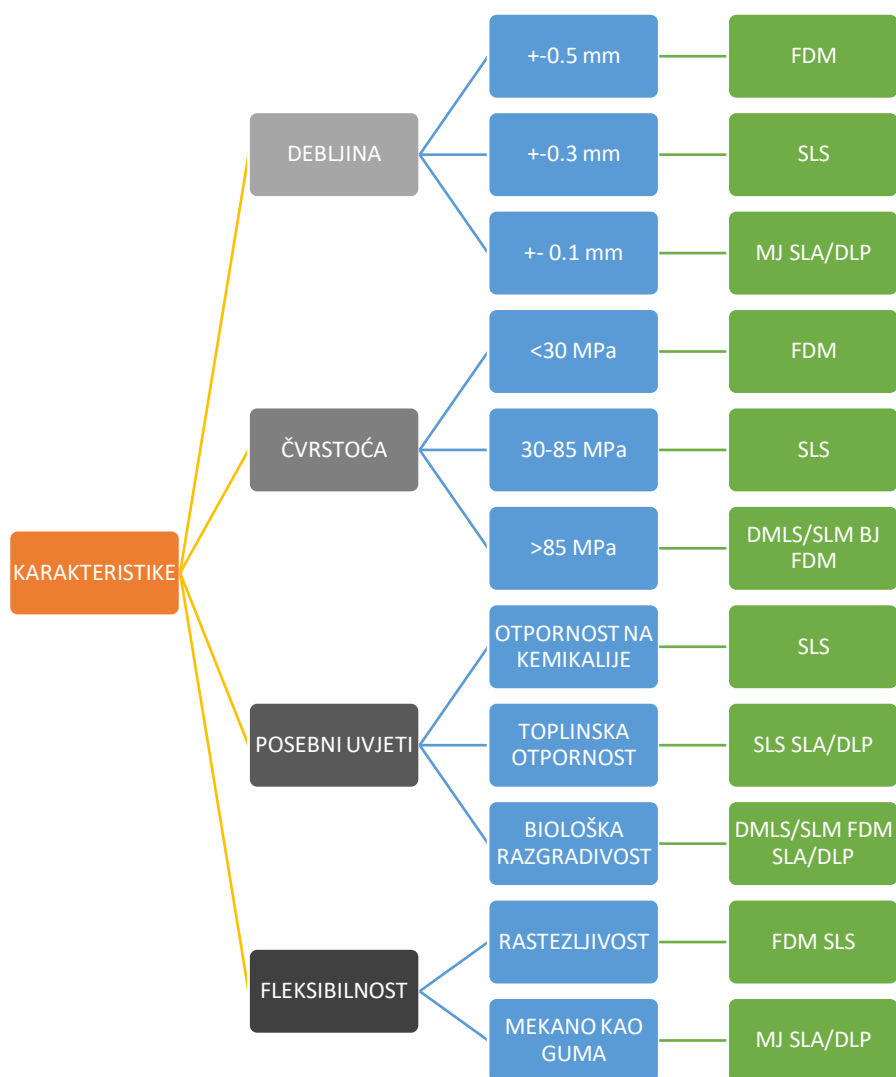
izraditi, što nekad nije najekonomičnije rješenje, ali se i ovdje može izaći u susret s jeftinijim materijalima iste tehnologije izrade. Prototip će biti ispisan prema zahtjevu koji je prioritet.

Tablica 7. Odabir 3D tehnologije prema zahtjevu [10]

ZAHTJEV	OPIS	TEHNOLOGIJA
Izrada prototipa	Kod izrade prototipova koriste se razne plastike kako bi izrada bila brza i jeftina.	FDM - Taložno očvršćivanje
Visoke temperature	Ispitana je izdržljivost toplinski otporne plastike na 80°C nakon toplinske obrade materijala.	MJ - Mlaznica materijala
Visoko kvalitetna završna obrada modela	Odabir završne obrade ovisi o vremenu i cijeni. Odabirom SLS tehnologije dobiva se mat završnica, a MJ SLA daje glatku, finu završnu obradu materijala.	SLS, SLA, MJ
Prozirnost	Koristi se plastika koja je prozirna, obično u situacijama kada model provodi tekućine.	SLA ili MJ
Savitljiv, elastičan, gibak	Savitljive plastike i gume za dugme i pokretne dijelove	Gumene plastike SLA elastični vosak

5.2. IZRADA MODELA

Pri izradi modela treba znati rukovati s više programskih alata, s osnovnim računalnim alatima te biti upoznat s 3D pisačem koji se koristi kako bi se u svakom trenutku mogle uočiti greške i ispraviti ih na vrijeme. Kod izrade modela u ovom radu, koristi se popularni program Ultimaker Cura 3.5.1 i 3D pisač, Original Prusa i3 MK2 FDM pisač iz linije RepRap dizajna, otvorenog koda. Alati su dostupni i za kućnu upotrebu što je i cilj linije RepRap - približiti tehnologiju 3D tiska rekreativnim korisnicima uz pristupačne cijene. Koristi se 0,1 - 0,15 mm *filament* ispuna od PLA i PETG plastike.



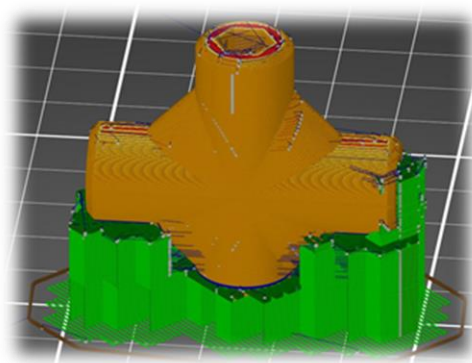
Slika 48. Odabir tehnologije prema željenim karakteristikama

Svi dijelovi printani su sa slojem od 0.2 mm. Korištena mlaznica (engl. *nozzle*) debljine 0,4mm napravljena je od mesinga odnosno mjedi. Temperature tiskanja PETG za prvi sloj iznose: mlaznica 240 °C, stol 85 °C, dok kod ostalih slojeva iznose: mlaznica 250 °C, stol 90 °C. Temperature tiskanja PLA za prvi sloj iznose: mlaznica 215 °C, stol 60 °C, a kod ostalih slojeva iznose: mlaznica 210 °C, stol 60 °C. Temperature tiskanja za korištene materijale preporuka su proizvođača. Ključevi su printani oko 1 h i 30 min po komadu. Cilindar brave električnog ormarića printan je oko 30 min.

Neki od načina dobivanja boljih mehaničkih svojstva tiskanih dijelova su eksperimentiranje s brojem perimetara i stupnjem popunjenosti tiskanog dijela (engl. *infill*). U ovom je slučaju korišten minimalan broj perimetara 2 jer se smatra dovoljnim da bi zadovoljio svoju svrhu i stupanj popunjenosti *infill* od 15 %. Ovdje se moglo postaviti i

100% popunjenosti dijelova ili veći broj perimetara, ali to uzrokuje nepotrebno produljenje vremena tiskanja, veći utrošak materijala i potrošnje energije, a da se time ništa znatno ne mijenja. Općenito se koristi od 15 do 30% *infilla*.

Potporni stupovi zakrenuti su u odnosu na predmet tiskanja za 45 stupnjeva zbog lakšeg odvajanja od gotovog dijela. Uvijek je cilj, kad god je to moguće, izbjeći potporne stupove jer oni uzrokuju nepotrebno produljenje vremena tiskanja i utroška materijala. Kod tiskanja, zato, orijentacija predmeta ima veliku ulogu. U ovom slučaju nisu se mogli izbjeći potporni stupovi zato što su rubni dijelovi ključa paralelni sa stolom, što je najgori mogući slučaj. Također, potrebno ih je izbjegavati jer oni narušavaju izgled površine zbog toga što ih je ponekad teško odvojiti, ali i to se nastoji izbjeći određenim postavkama. Za materijal potpornih stupova moguće je koristiti materijale koji su topljivi u vodi tako da ne treba brinuti o poteškoćama pri njihovom odvajanju. Takve vrste filamenata znatno su skuplje. Pravilo 45 stupnjeva može se primijeniti kod FFF ili FDM 3D tiskanja jer svaki prethodni sloj predstavlja oko 50% potpore idućem tiskanom sloju pa na taj način sve što se nalazi od osi z do kuta od 45 stupnjeva ne treba potporni stup. Ipak, u slučaju da je kut veći, obavezni su potporni stupovi za uspješan tisak.



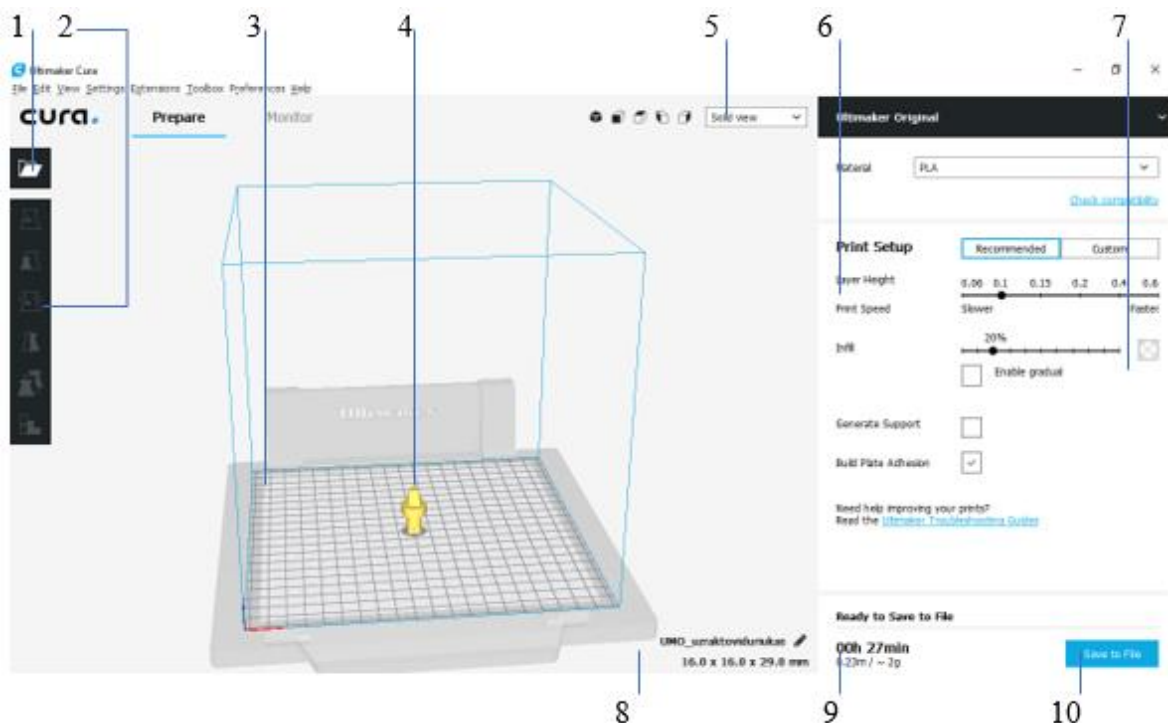
Slika 49. Slojeviti prikaz modela

5.2.1. Ultimaker Cura 3.5.1

Cura je otvoreni izvorni program za „rezanje“, odnosno pripremanje 3D pisača za ispis modela. Stvorio ga je David Braam, a kasnije je tvrtka Ultimaker isti taj program koristila za proizvodnju 3D pisača, odnosno za održavanje softvera. Cura je dostupna pod licencom LGPLv3. U početku je ona izdana u verziji tri otvorene inačice *Affero Public License*, ali 28. rujna 2017. licenca je promijenjena u LGPLv3. Ova je promjena dopuštala više integracije s aplikacijama CAD treće strane. Razvoj je smješten na *GitHubu*. Program Ultimaker Cura koristi više od milijun korisnika diljem svijeta, preferira se kao 3D softver za ispis kod korištenja Prusa 3D pisača, ali se može koristiti i kod drugih. [2]

Dijelovi programa Ultimaker Cura:

1. Otvori datoteku
2. Podešavanje
3. Prostor gdje se ne izrađuje model
4. 3D model
5. Prikaz se može postaviti na tri različita načina (Stvarni prikaz, X-Ray, Slojevi)
6. Tisak, Matrica tiska i podešavanje materijala prema stupnju veličine
7. Informacije o modelu
8. Spremi datoteku, na SD karticu ili preko mreže

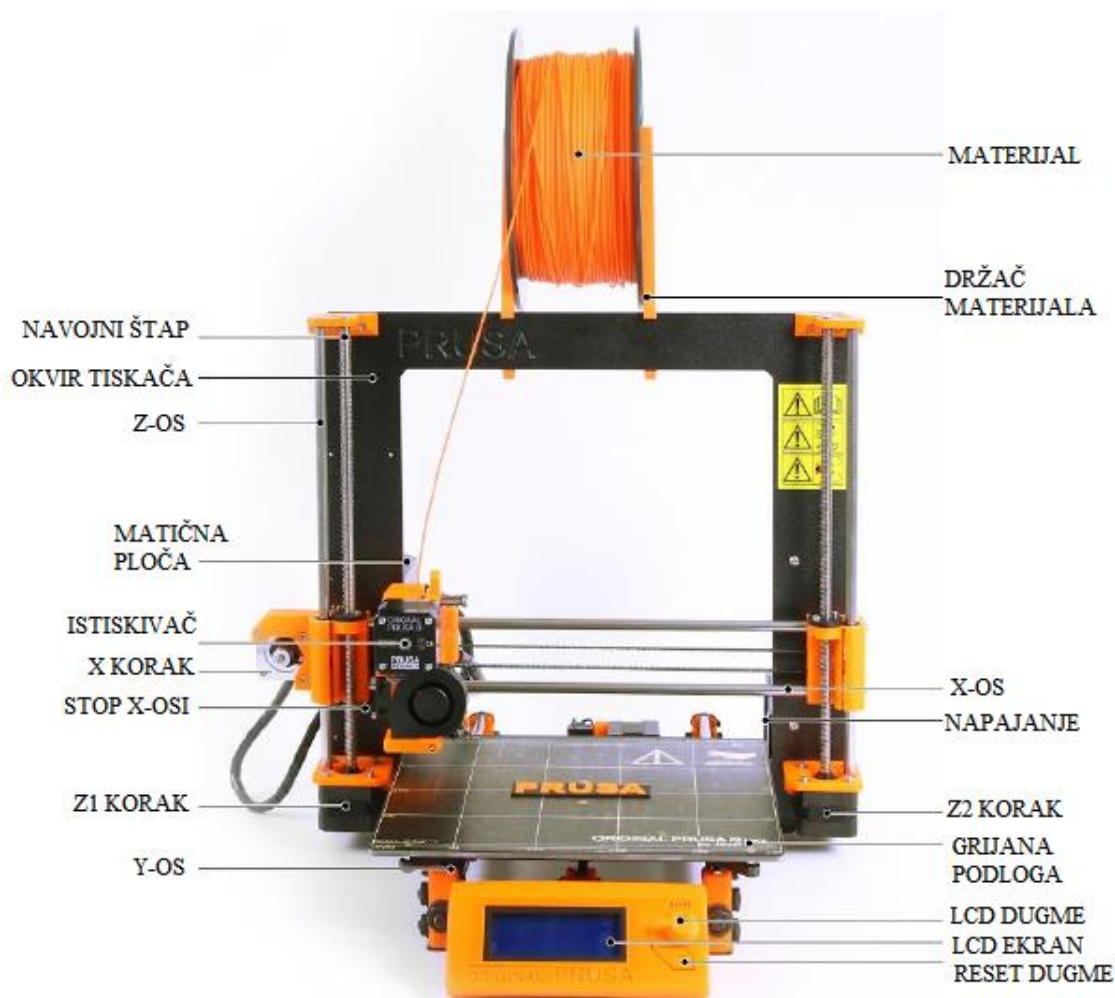


Slika 50. Ultimaker Cura program

Vrlo jednostavno i pregledno sučelje dopušta promjenu osnovnih uvjeta tiska, a za zahtjevnije korisnike ima i pogodnosti detaljnog prilagođavanja tiska i detaljnijeg pregleda tiska. Ovaj program unaprijed izračunava potrošak materijala, što se vidi na broju 9 popisa s dijelovima programa. Ovisno o tome koliko je korisnik upoznat s dizajnom pojedinog modela, mogu se podešavati najmanji detalji ispisa, od ispuna i debljine, brzine ispisa i pregleda ispisa, potpore, hlađenja i slično, ovisno o tipu pisača koji se koristi. Postoji nekoliko ograničenja modela koja bi se trebala uzeti u obzir prije pretvaranja modela u STL datoteku, uključujući fizičku veličinu, vodonepropusnost i broj poligona.

5.2.2. Original Prusa i3 MK2 FDM 3D pisač

Josef Prusa inovator je ovog 3D pisača, zaslužan za približavanje tehnologije 3D tiska svakodnevnim rekreativnim korisnicima. Ovaj printer dio je RepRap projekta i izrađen je na farmi printera koji printaju vlastite dijelove. Ima otvoreni kod i fleksibilan je za nadogradnju i implementaciju poboljšanja koju korisnici zahtijevaju. U slučaju da se žele koristiti industrijske plastike, printer je potrebno zatvoriti u mikroklimatske uvjete, što je moguće i s ovim modelom uz nadogradnju zatvora. [6]

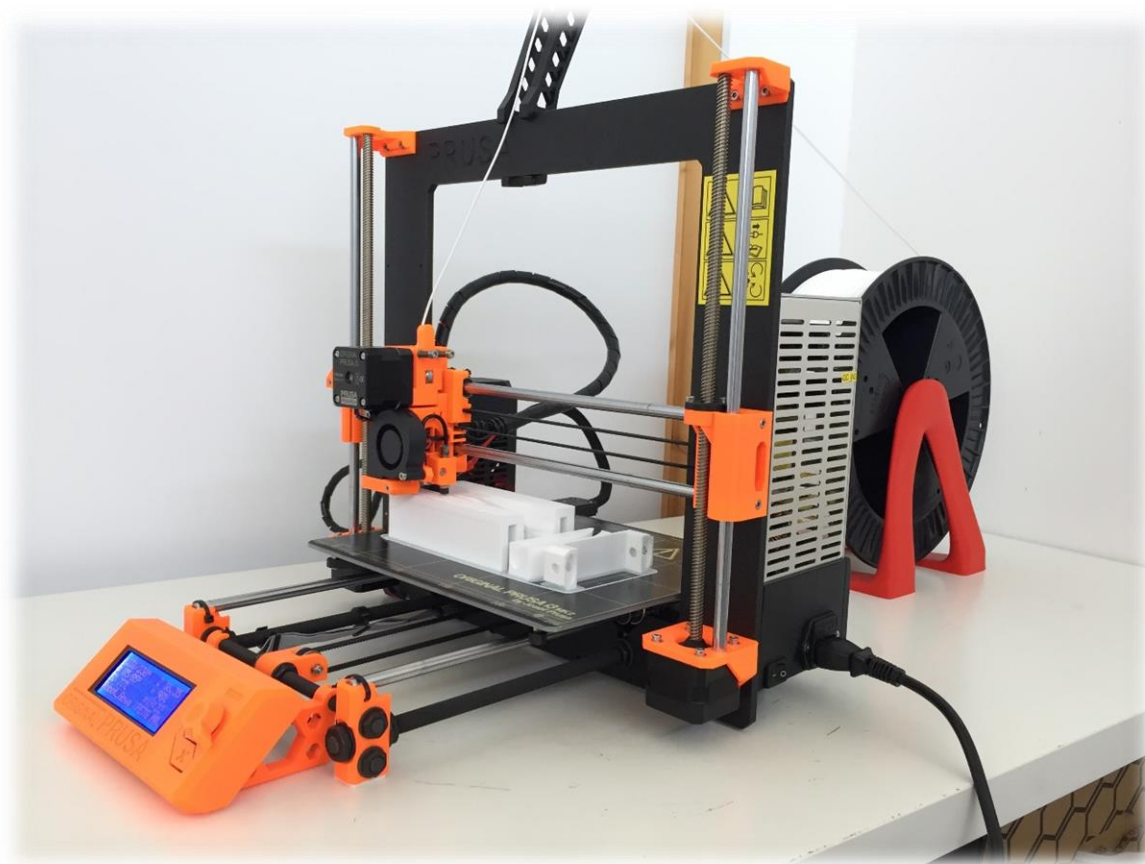


Slika 51. Original PRUSAi3 MK2 3D printer [10]

Ovaj je pisač najbolji 3D pisač u kategoriji omjera cijene i kvalitete te je na vrhu popisa najnaprednijih stolnih pisača. Sa sjedištem u Pragu, originalni dizajn Prusa i3 potpuno je otvoren, daje mogućnost nadogradnje i poboljšavanja hardvera printanjem vlastitih dijelova. MK2 dolazi s mnoštvom pametnih značajki koje ga razlikuju od sličnih pisača u ovom cjenovnom rasponu.

MK2 ima volumen od 250 mm x 210 mm x 200 mm, što je malo veće od većine stolnih pisača. Jedna je od najimpresivnijih značajki ovog pisača grijana podloga MK42 koja ima puno više mogućnosti od samog zagrijavanja. Sadrži i prilagođeni grijač s PCB-om (tiskanim pločama) i tankom PEI folijom na vrhu. To znači da se brzo zagrijava i brzo hladi te ima fantastično prianjanje. Također, podloga ima kalibracijske točke koje mogu automatski kalibrirati zakretnu os. U kombinaciji s induktivnom sondom za automatsko izravnavanje slojeva, čini kalibraciju laganom, što inače nije slučaj. I3 MK2 dolazi s tihim načinom rada u kojem se snaga smanjuje što rezultira mnogo tišim procesom ispisa. Ova jedinstvena značajka ograničena je na ispise ispod 400 grama.[10]

Izvorni Prusa i3 MK2 projekt uveo je revoluciju u 3D tiskovnoj zajednici otkad je pokrenut. Proračunski je „pobjednik“ s velikim potencijalom.



Slika 52. Original PRUSAi3 MK2 3D printer iz radionice

Upravo ovim printerom sa Slike 45. tiskani su modeli navedeni u tekstu; pisač je vrlo zahvalan za rad, jednostavan za upotrebu i napravljen prema potrebama rekreativnih korisnika.

5.2.3. Troškovnik

U Tablici 6. u nastavku nalaze se podaci izrade dva modela izrađenih različitim tehnologijama 3D tiska. Simulacijom njihove izrade dolazimo do dva bitna ekonomska faktora. Cijena i vrijeme u današnjem svijetu dolaze do izražaja i često su od presudne važnosti kod implementacije nekog proizvoda ili rješenja. Nakon rezultata dobivenih iz tablice, doneseni su zaključci.

Proizvođač dolazi do krajnje cijene proizvoda na način da se prvo izračunaju troškovi izrade za jedan proizvod, jedan tisak:

- Troškovi stroja [S]: potrošnja električne energije, najam prostora ako takvo što postoji, amortizacija stroja, održavanje stroja, potrošni dijelovi stroja (mlaznica, podloga), čime se dobije cijena radnog sata stroja
- Troškovi materijala [M]: cijena materijala kojim se model izrađuje, što se mjeri u gramima kod FDM-a, a što kod SLA tiska u litrama, ovisi o nabavi
- Troškovi operatera [O]: satnica operatera što uključuje provjeru STL datoteka, izradu i ispravku datoteke te pripremu g-koda kao i pripremu printera za rad: stavljanje materijala, čišćenje i pripremu podloge, otklanjanje modela s podloge, otklanjanje potpornog materijala te čišćenje i dorađivanje modela; pripremu modela za paket i slanje krajnjem korisniku.
- Troškovi neuspjeha [N]: s obzirom na to da 3D tehnologija još uvijek nije stopostotna, dolazi do grešaka koje rezultiraju ponavljanjem cijelog postupka, što se dodaje na prijašnje troškove zbrajanje i dodavanjem 10% od ukupnog zbroja.
- Marža, postotak zarade na izrađeni objekt [Z] iznosi oko 140% na cijenu [C].


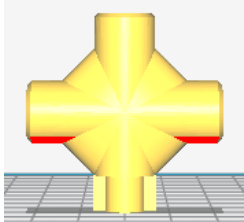
Ukupna, odnosno konačna cijena [U]:

$$[(S + M + O) + N] + C \times 1.4 = U \quad (8)$$

$$C = [(S + M + O) + (S + M + O) \times 0.1] \quad (9)$$

$$[(S + M + O) + (S + M + O) \times 0.1] + [(S + M + O) + (S + M + O) \times 0.1] \times 1.4 = U \quad (10)$$

Tablica 8. Analiza cijene i vremena izrade modela

POSTUPAK	MATERIJAL	PROIZVOD			
					
		DIMENZIJE: 16x16x29 mm		DIMENZIJE: 14x44x44 mm	
*cijene bez PDV- a u obliku ponude		Cijena	Vrijeme	Cijena	Vrijeme
SLA	ABS	120 kn	75 min	271 kn	2,5h
	ABS + topla obrada	750 kn	75 min	1455 kn	2,5h
	Akrilna smola 100µm	130 kn	75 min	271 kn	2,5h
	Akrilna smola 150µm	100 kn	51 min	197 kn	1,7h
SLS	PA12	310 kn	65 min	618 kn	2,2h
	PA12 + stakl. čestice	310 kn	65 min	618 kn	2,2h
3DP	Gips 150	150 kn	20 min	372 kn	0,75h
	Škrob 15e + elasto.	250 kn	20 min	541 kn	0,75h
FDM	ABS	105 kn	27 min	216 kn	1h
FDM industrijski	ABS	100 kn	40 min	181 kn	1,5h
PolyJet akrilna smola	DurusWhite	215 kn	70 min	462 kn	2,5h
	FullCure	200 kn	60 min	400 kn	2h
	VeroBlack	200 kn	60 min	400 kn	2h
	VeroBlue	200 kn	60 min	400 kn	2h
SLM	Ne hrđajući Čelik 30µm (60 µm / 2)	900 kn	4h	1741 kn	8h
	Visoko legiran čelik 30µm (60 µm / 2)	500 kn	2h	1000 kn	4h
EBM	Ti6Al4V	1100 kn	3h	2400 kn	5,9h
	Ti6Al4V + topla obrada vruće izostat prešanje (2)	2000 kn	3h	4135 kn	5,9h
	Ti6Al4V + topla obrada homogenizacija (3)	1800 kn	4,5h	3600 kn	8,8h
	Ti6Al4V +(2)+(3)	2500 kn	4,2h	5330 kn	8,8h

Razlike u cijenama također određuje položaj u kojem se model ispisuje, kao i struktura potpornog materijala koja ovisi o položaju. Ako dimenzije nisu prikladne stroju, izrađuju se u više dijelova koji se naknadno spajaju i lijepe, što iziskuje više vremena tehničara i izravno utječe na cijenu. Svakako, u formuli izračuna cijene ne postoji niti jedna stavka za koju se, u danom trenutku, može jamčiti da je jedinstvena. Cijene materijala padaju iz godine u godinu i razvijaju se vrlo brzo pa cijene nije lako standardizirati. Vrijeme izrade također se smanjuje poboljšavanjem strojeva i poboljšavanjem STL datoteke modela te usavršavanjem tehničara. U slučaju da broderska kompanija uspostavi svoj vlastiti razvoj tehničara i nabave materijala, pojednostavljuju se izračun cijene i vremena izrade.



Slika 53. Trošak neuspjeha izrade vijka

Slicer program „izbacuje“ podatke za model kao što su vrijeme tiskanja i gramaža materijala te se oni zatim upisuju u tablicu, zajedno s podatkom o vremenu potrebnom za upravljanje strojem te za pripremu g-coda, odakle je vrlo lako postaviti transparentnu konačnu cijenu za krajnjeg korisnika. Cijene materijala i radnog sata stroja mijenjaju se i variraju te nije lako postaviti okvirnu cijenu prije razrade ideje modela. Cijene tehničara i standardi različitih zemalja također su različiti pa se cjenik još uvijek nije standardizirao na globalnoj razini.

5.2.4. Model cilindra brave električnog ormarića

Električni ormarić sigurnosni je ormar u kojem se nalaze glavne sklopke, limitatori, mjerila i glavno napajanje koje se raspoređuje na manje potrošače i korisnike koje zaštićujemo osiguračima. Ormarić mora bit vidljiv, ali dostupan samo ovlaštenim osobama. Prilikom rukovanja bravom, ako se učestalo koristi, može doći do trošenja, habanja materijala čime se gubi funkcionalnost brave i potrebna je zamjena. Ovakva vrsta kvara nije česta, ali je važna kvalitetna i brza reakcija kako bi se osiguralo napajanje na siguran način. Zbog specifičnosti problema koji nije svakodnevna, pričuvni dio, odnosno zamjenska brava, u većini situacija neće bit nadohvat ruke, neće biti na zalihama u skladištu.



Slika 54. Cilindar brave električnog ormarića

Ovakav je model unaprijed standardiziran pa je kod njegove izrade vrlo lako pronaći otvoreni kod - model besplatan za korištenje. U programima poput AutoCAD-a može se izraditi komad po mjeri koji će se kasnije u formatu koji prepoznaje rezač (eng. *slicer*), odnosno program koji model čini razumljivim stroju pripremiti ga za tisak.

Najvažniji, ujedno i najzahtjevniji, dio 3D tehnologije jest dizajn. 3D dizajner je tehničar koji mora razumjeti sve uvjete i zadaće koje se stavljaju pred model koji će dizajnirati. Mora upoznati prostor u kojem će djelovati dizajnirani model i koje će uvjete podnositi te koje će se sile na model odvijati. U smjeru z-osi 3D tiskani predmet je najranjiviji, dok je u ostalim osima mnogo čvršći. Zbog tog je razloga razumljivo kako je vrlo važan odabir položaja tiska određenog modela. Iz primjera sa slike 48. jasno se vidi

kako je položaj u kojem je tiskan primjer cilindra brave električnog ormarića jednak položaju modela sa slike. Slojevi deponiranja rastaline jasno se vide, što se može izbjeći završnom obradom poliranja predmeta. Gustoća slojeva također se može regulirati. Na to dizajner, iz estetskih, ali i tehničkih razloga, mora obratiti pažnju.



Slika 55. Cilindar brave električnog ormarića izrađen FDM tehnologijom

Iz primjera sa slike 48. može se uočiti kako nije jednostavno projektirati predmet sa zakrivljenim plohama jer takav predmet ne dopušta slobodu odabira. Tehnikom taložnog očvršćivanja zakrivljene površine stvaraju problem. Primjer je upravo ovaj model, u slučaju da je tiskan u horizontalnom položaju, „polegnuto“, jer krivulja u tom slučaju nije idealna.

Proces tiskanja modela započinje njegovim dizajniranjem u neki od ponuđenih programa: Sculptris, Vectary, Figuro, SketchUp Free, Fusion 360, FreeCAD, Blender i OnShape. CAD programi ispunjavaju sve potrebe dizajna 3D modela. Ako od strane projektanta postoji već ponuđena STL datoteka spremna za tiskanje, a uoči se neka greška, može ju se ispraviti pomoću FreeCAD programa, tzv. *Open sourcea*, koji je besplatan za korištenje, a ujedno i jednostavan. FreeCAD program, dakle, nije pogodan za modeliranje već za ispravljanje nekih manjih strukturalnih grešaka, što je i ovdje bio slučaj.

Datoteka u obliku STL-a (engl. *Standard Tessellation Language*) pogodna je za završnu izvedbu tiskanja modela. Kad se STL datoteka generira, datoteka se uvozi u program

za rezanje. Model se tiskao pomoću Cura Ultimaker programa. Već je prije opisano kako program ima razne postavke prije nego što se on obradi i pošalje na tiskanje. Kao najosnovnije, zadaje se brzina tiskanja i rezolucija, odnosno ispuna. Priloženi objekt tiskan je prema podacima iz tablice 7.

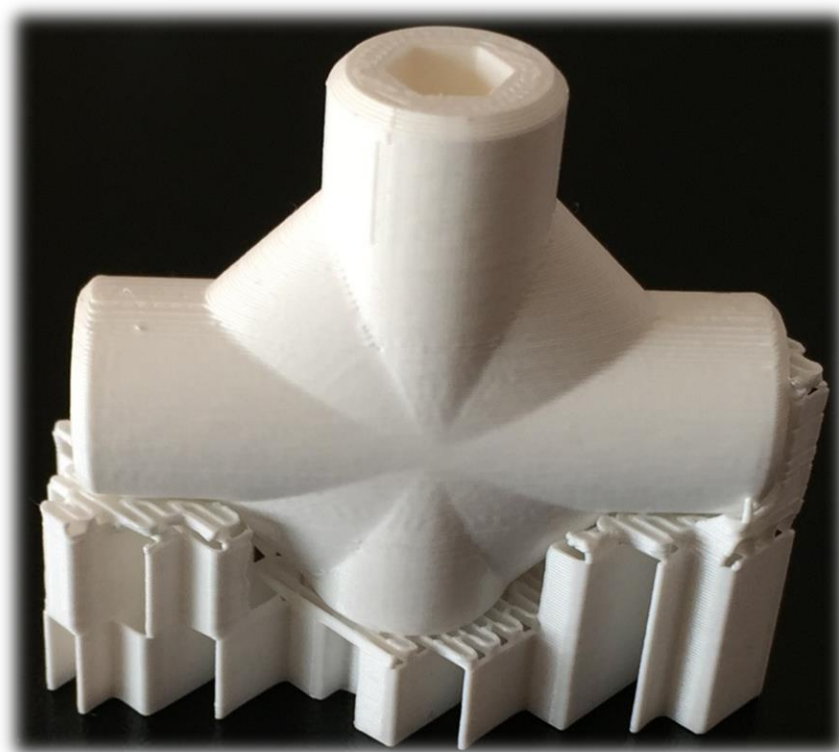
Tablica 9. Opis načina obrade modela 3D tiska cilindra brave el. ormarića

OPIS	NAČIN	VELIČINA	RAZLOG
Kvaliteta	Visina sloja	0.1mm	Viši sloj znači brži tisak, manja rezolucija, niži sloj doprinosi kvaliteti, ali pri tome sporiji tisak.
Ispuna	Gustoća tiska	20%	Vizualni efekt, ojačavanje strukture, ovisi u materijalu:
	Oblik ispune	mreža	Postoji više desetaka oblika, svaki ima razlog - mrežasti je uobičajen.
Materijal	Temperatura	200° C	Prema vrsti materijala odabire se temperatura.
Brzina	Brzina tiska	60mm/s	Ovisi o složenosti modela, određuje brzinu izbacivanja materijala.
Put	Odabir	Z hop	Odabir načina prebacivanja s praznih dijelova na strukturu, način da se izbjegne dodir.
Hlađenje	Brzina puhanja	100%	Hlađenje omogućuje kvalitetniji tisak i srašćivanje slojeva upravo kod PLA materijala.
Potpورا	Odabir	Bez	Ako je moguće, tiskati objekt bez potpore zbog uštede materijala i vremena.
Postolje	Izbor načina	Brim	Dodaje tanki sloj „plašt“ oko objekta radi kvalitetnijeg printa i onemogućava prevrtanje. Objekt se na ovaj način bolje zalijepi na podlogu.

Predmet je tiskan iz više pokušaja, i zbog neiskustva i zbog nekih od uobičajenih tehničkih problema s kojima se tehničar susreće. Problem začepljenja mlaznice vrlo je učestao kod neiskusnih korisnika, a rješava se rastavljanjem mlaznice i daljnjim korištenjem pri zadanim temperaturama. Održavanje samog pisača uvelike olakšava i minimalizira ovakve probleme. Predmet je upotrebljiv za korištenje i pouzdan iako je napravljen od jeftinog materijala. Kvaliteta izrade ovog malog i jednostavnog predmeta dovodi do zaključka kako 3D tehnologija ima predispoziciju biti isplativa i pouzdana.

5.2.5. Model univerzalnog ključa električnog ormarića

Ovakav model specifičnog je oblika za FDM 3D tehnologiju iz razloga što ima zakrivljene linije, odnosno pravilne kružnice na krajevima. U primjeru modela cilindra brave javlja se ponovno isti problem, međutim na ovaj model djeluje se silom sa svih strana što dodatno otežava stvaranje idealnog modela tehnikom taložnog očvršćivanja. Dizajniranjem se mora paziti na orijentaciju pri istiskivanju materijala, kako ne bi bilo previše materijala podrške, bespotrebno upotrijebljenog materijala, čime se povećava trošak i vrijeme izrade.



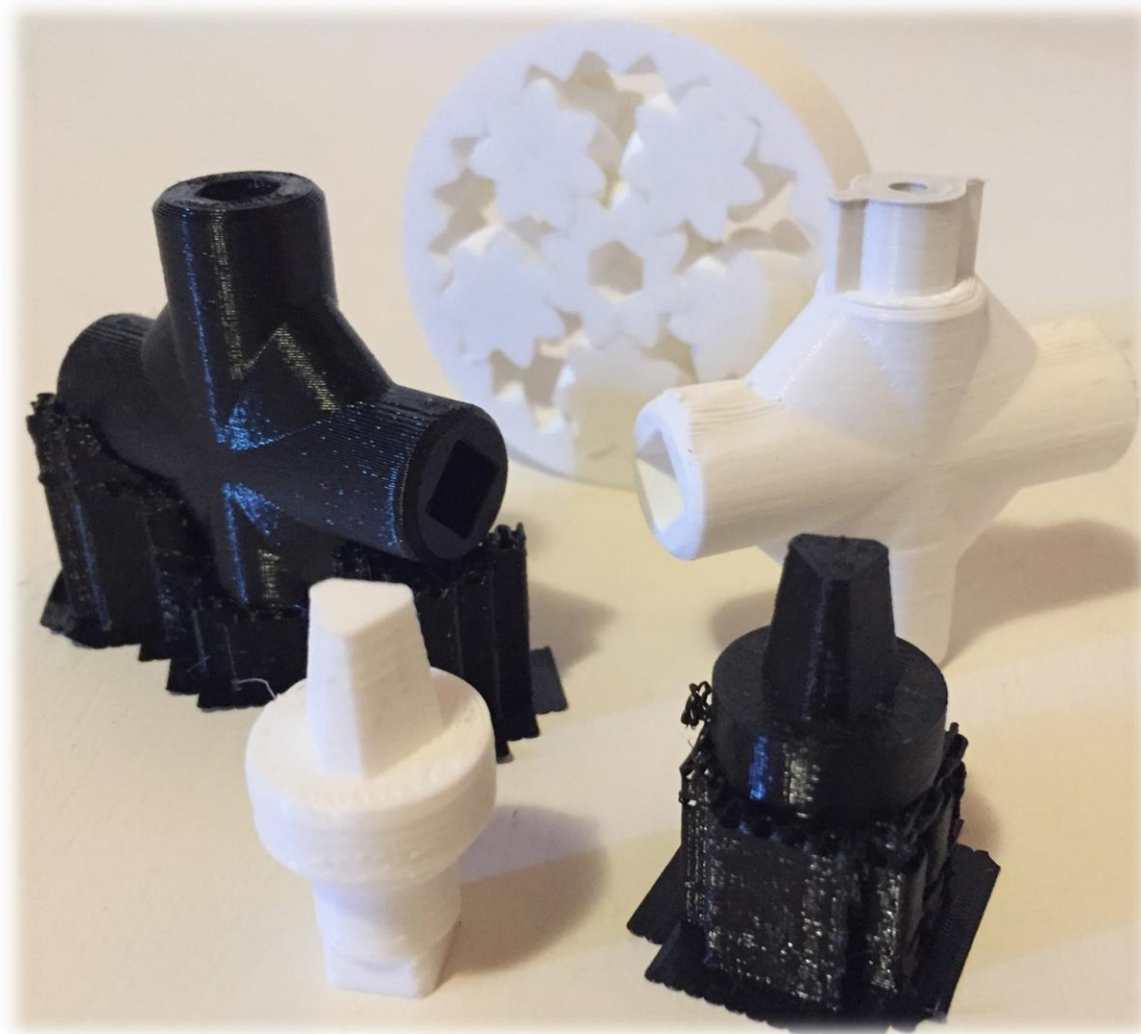
Slika 56. Univerzalni ključ električnog ormarića tiskan FDM 3D tehnologijom

Prilikom izrade ovog predmeta metodom pokušaja i promišljanja zaključeno je kako predmet ne može biti kvalitetno ispisan 3D tehnologijom. Sama izrada nije problematična, zapravo je vrlo jednostavna i ne iziskuje mnogo vremena, ali predmet nije pouzdan. Ovo je klasičan primjer poteškoće FDM tehnologije 3D tiska, gdje orijentacija tiskanja ne može izbjeći lomljivost u svakoj osi. Sile koje djeluju pri upotrebi ovakvog predmeta ne mogu se izbjeći. Odabirom drugog materijala, gustoćom ispune i završnom obradom može se osposobiti predmet za uporabu, no i dalje ne može biti kvalitetna zamjena originalu.

Tablica 10. Opis načina obrade modela 3D tiska univerzalnog ključa el. ormarića

OPIS	NAČIN	VELIČINA	RAZLOG
Kvaliteta	Visina sloja	0.15mm	viši sloj (veća brojka) znači brži tisak, manja rezolucija (grublja) a ujedno i veća čvrstoća modela jer nema puno malih slojeva sa mehaničkim vezama između.
Ispuna	Gustoća tiska	15%	vizualni efekt, ojačavanje strukture, ovisi u materijalu, namjeni i željenoj težini modela
	Oblik ispune	Mreža	postoji više desetaka oblika, svaki ima razlog; mrežasti je uobičajen
Materijal	Temperatura	215° C	prema vrsti materijala odabire se temperatura
Brzina	Brzina tiska	60mm/s	ovisi o složenosti modela, određuje brzinu kretanja glave printera, pa je prema tome i dio izračuna za „iskoristivost“ materijala.
Put	Odabir	Z hop	odabir načina prebacivanja sa praznih dijelova na strukturu, Z hop ima malo efekta na mehaničke performanse modela; služi većinom za estetiku i prevenciju kako glava printera slučajno ne bi dotaknula model za vrijeme kretanja
Hlađenje	Brzina puhanja	100%	hlađenje omogućuje kvalitetniji tisak kod PLA materijala i srašćivanje slojeva
Potpورا	Odabir	Bez	ako je moguće, tiskati objekt bez potpore, radi uštede materijala i vremena
Postolje	Izbor načina	Brim	dodaje tanki sloj, „plašt“, oko objekta zbog kvalitetnijeg printa i onemogućava prevrtanje objekta, posebno ako je on uzak i visok

Model je izrađen od 2.67m PLA materijala, točnije 6418.26mm³ materijala. U trošak izrade ubraja se težina materijala od 7,96g, što bi bilo približno 0.5€ materijala prema prosječnoj cijeni trenutnog tržišta. Za izradu ovog modela u normalnom *modu* potreban je 1h 45min 39sec, no ako se izrađuje „tihom“ opcijom bit će potreban 1h 46 min 11 sec. Materijal podrške koristio se samo za podlogu, prvi sloj koji je potrebno odvojiti od podloge koji se naknadnom obradom otklanja s modela.



Slika 57. Modeli izrađeni PLA (bijelo) i PETG (crno) materijalom

Modeli su izrađivani po principu pokušaja i promašaja. Ujedno su se koristili PLA materijal i PETG materijal zbog svojih svojstava. Razlike su u čvrstoći i temperaturnoj izdržljivosti. PETG materijal ima malo bolja svojstva, stoga je i nešto skuplji, međutim kod izrade ovako malih modela i minimalnim brojem ponavljanja izrade, cijena je zanemarivo viša. Pri izradi modela korišteni su različiti parametri, a pokušajem i promašajem postigla se željena točnost, čvrstoća te brzina izrade. Kod PETG materijala potrebna je grijana podloga za razliku od PLA materijala, no prijanjanje slojeva kod PETG materijala znatno je bolje, što se očituje snažnim i izdržljivim tiskom. Univerzalni ključ električnog ormarića izrađen PETG materijalom može se, stoga, smatrati korisnim i upotrebljivim iako se zbog već spomenutih razloga korištenja ključa ne može garantirati jednaka čvrstoća i izdržljivost kao kod originalnog metalnog ključa.

5.2.6. Model zupčanika

Ovakav model zupčanika klasičan je primjer snage i moći aditivne tehnologije i uporabe 3D tiska sa svim svojim prednostima. Model zupčanika osmišljen je na način da su unutarnji zupčanici međusobno povezani vanjskim kružnim zupčanicom pa je model, kao takav, nalik ležajevima elektromotora. Materijal koji se koristio svakako nije pogodan za izradu ležajeva, ali se može vrlo lako koristiti u prijenosu sile manjih elektromotora na sekundarni uređaj pokretan elektromotorom. Model je izrađen iz jednog tiska te naknadno obrađen kako bi bio pokretan, a ujedno ostao kompaktan kao cjelina.



Slika 58. Model zupčanika

Model je izrađen prema Tablici 9., jednakih postavki kao i za model cilindra brave električnog ormarića. Materijal izrade je PLA (engl. *poly lactic acid*), biorazgradivi tip plastike ili „zelena plastika“. Izvorno nastaje od listova kukuruza, odnosno molekula šećera koji se pronalaze u istom. Visoki standardi regulative odlaganja otpada na brodovima također doprinose tehnologiji 3D tiska uz PLA materijale koji su ekološki prihvatljivi. PETG materijal svojim bi svojstvima izdržljivosti i čvrstoće, kao i lakoćom korištenja, također pronašao svoje mjesto u izradi pričuvnih dijelova na brodu.

6. ZAKLJUČAK

Brod je specifično okruženje idealnih uvjeta i nepredvidljivih problema. Brodovi se mogu podijeliti po veličinama, vrsti upotrebe, vrsti tereta i drugome, gdje se otvara prvo pitanje istraživanja mogućnosti implementacije 3D tiska na brodu. Ovaj je rad, stoga, fokusiran na brodove općenito, bilo da pristaju u luku u kraćim ili dužim periodima.

Istraživanjem 3D tehnologije tiska utvrđeno je kako ovu tehnologiju više ne treba oslovljavati novom tehnologijom jer je prisutna u svim segmentima industrije, za privatne potrebe u komercijalne svrhe i rekreativne potrebe. Svojom je cijenom i jednostavnošću upotrebe dostupna svima te ju koriste učenici osnovnih i srednjih škola, studenti, umirovljenici i profesionalci. Kao jednostavno rješenje u svakodnevnoj upotrebi zaključeno je kako je to isto rješenje jednako dobro i za korištenje na brodu. Takvo bi rješenje bila tehnologija deponiranja rastaline, odnosno taložno očvršćivanje. Odabirom pravih materijala ovom se tehnologijom mogu izraditi rezervni dijelovi čak i, u nekim segmentima, boljih svojstava od originalnih rezervnih dijelova.

Prije pisanja rada, postojao je osjetno manji udio znanja o aditivnim tehnologijama i još manje iskustvo s brodovima gdje bi se navedene koristile. Upoznavanjem 3D tiska zaključeno je kako postoji velika šansa za implementiranje 3D tehnologije u izradi rezervnih dijelova na brodu, što su i dokazale neke tvrtke s pilot projektima uvođenja 3D tiska na svojim brodovima. U međuvremenu je autor ovog istraživanja pristupio plovidbi na brodu teretnog tipa srednje veličine i, iz iskustva s mnogim tamošnjim tehnološkim i drugim izazovima, otkrio drugu stranu problema implementacije.

Brod mora biti planski napravljen i izgrađen po točno određenim mjerama, propisima i standardima te, kao takav, izvorno biti u mogućnosti implementirati 3D tehnologiju za izradu rezervnih dijelova. Posebna prostorija za izradu sa svojom mikroklimom i posebna prostorija za skladištenje materijala (također pod posebnim uvjetima) prvi su i neophodni uvjeti pri implementaciji 3D tehnologije na brodu.

Trenutno se na brodu sve više koriste plastični impeleri za ventilatore električnih motora bez obzira na mjesto upotrebe. Kompresori, rashladni uređaji, ventilatori skladišta, hladnjaci računalne opreme i ventilatori električnih motora - svi redom koriste plastične impelere koji su zamjena za metalne legure netolerantne na hrđu, sklone pucanju i habanju. Ovaj rad otvara mogućnosti za detaljnu obradu nekog od pričuvnih dijelova, a, prema

preporuci autora, prvenstveno se treba usmjeriti na plastične impelere i razvoj kvalitetnih modela koji će se u budućnosti tiskati na brodovima i koristiti kao zamjena za originale.

Aditivni postupci proizvodnje, u koje se ubraja i trodimenzionalno tiskanje, svoju prednost iskorištavaju cijenom i uštedom vremena te skraćivanjem faza konstrukcije modela. Ne ovise o složenosti geometrije modela i mogu zamijeniti dio CNC poslova te brojne ručne radove od kojih mnogi nisu u mogućnosti biti napravljeni iz jednog komada. Kao što je već spomenuto, „preskaču“ se neke faze konstrukcije i istovremeno se lakše pronalaze i ispravljaju greške u dizajnu. Ovakvi postupci svakako imaju svojih negativnih strana, primjerice na područjima cijene i vremena utrošenog u rad, servisiranja, čišćenja i gubitka u potpornim materijalima. Teško je ocijeniti koliko je izrađenih modela 3DP tehnologijom potrebno da oni budu isplativi.

Izradom cilindra brave i ključa električnog ormarića, kao i mnogih drugih, odrađen je praktični dio ovog rada. Problema pri izradi je bilo, ali nikakvih značajnijih, a zbog nedovoljnog iskustva autora, utrošeno je nešto više vremena i materijala. Postavkom autora kao tehničara neiskusnog u modeliranju i izradi 3D objekata, izravno je provedeno istraživanje potrebne edukacije i vremena pri izradi 3D modela. Zaključeno je kako nije potrebno veliko predznanje za upotrebu osnovnih postavki izrade modela i da je na brodu moguće osposobiti radnika za nadzor izrade već gotovog modela. Izradom ovako jednostavnih, no ujedno i pouzdanih modela stvara se slika o neizbježnoj implementaciji 3D tiska rezervnih dijelova na brodu koja se očekuje u skoroj budućnosti. Bazom podataka modela rezervnih dijelova osposobljeni radnik u mogućnosti je osigurati ispravan rad 3D pisaača prije, tijekom i nakon izrade željenog rezervnog dijela.

Pri izradi plana implementacije treba početi od edukacije osobe koja će biti u mogućnosti postaviti uređaj u *standby mode* postavku spremnu za rad te uređaj pripremiti za isključivanje i uključivanje. Na brodu na kojem se nalazi autor ovog rada trenutno nema mjesta za prije spomenutu tehnologiju, kao ni interesa za nju. Potreba za izradom nekih dijelova postoji, no nije neophodna jer ovakav tip broda pristaje u luku relativno često pa nije teško nabaviti potrebne rezervne dijelove. Prema navedenom, može se zaključiti kako je 3D tehnologija i dalje nepoznanica u broderskoj industriji u kojoj tek treba postaviti zdrave temelje za implementaciju spomenute tehnologije. U bližoj povijesti brodske industrije nije postojala mogućnost komunikacije s kopnom, dok je danas moguće prenositi sliku i zvuk u realnom vremenu, zajedno s velikom količinom podataka i informacija. Implementacija 3D tehnologije tiska pričuvnih dijelova na brodu, prema tome, neizbježna je i moguća upravo u ovom trenutku.

LITERATURA

- [1] Alkaios Bournias Varotsis: *3D Printing vs. CNC machining*, 3DHubs, 2018. URL: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining>, (pristupljeno 30. 3. 2019.)
- [2] Cura, manual, Cura user manual for Cura 13.11.2 URL: <https://ultimaker.com/en/resources/manuals/software> (pristupljeno 30. 3. 2018.)
- [3] Geissbauer R. Wunderlin J., Lehr J., *The future of spare parts is 3D*, Hamburg 2015.
- [4] Moltke I., Maritime guide to 3D print, URL: <https://greenship.org/wp-content/uploads/2017/01/App-3DP.pdf> (pristupljeno 22. 5. 2018.)
- [5] Održavanje broda, Održavanje brodskih sustava, URL: <https://www.pfri.uniri.hr/dokumenti/Odrzavanje.broda.pdf> (pristupljeno 12. 7. 2018.)
- [6] Prusa J., manual, *3D printing handbook*, 2016. URL: https://prusa3d.com/downloads/prusa3d_manual (pristupljeno 15. 3. 2018.)
- [7] Šrečer M., Godec D., Piplović A., *Aditivna tehnologija za mala, srednja i velika poduzeća*, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [8] Vujović I., Šoda J., Kuzmanić I.: *Utjecaj tehnologije 3D tiskanja na raspoloživost brodskih sustava*, Naše more, Sveučilište u Dubrovniku, 62 (4), 2015., str. 93-96.
- [9] 3D Hubs, Knowledge base. URL: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base> (pristupljeno 28. 8. 2018.)
- [10] 3D Hubs, What is 3D Printing. URL: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base> (pristupljeno 3. 5. 2018.)
- [11] 3D Printing, The Definitive Guide. URL: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/> (pristupljeno 1. 9. 2018.)

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1. Prijenos digitalnog modela s računala na 3D pisac	2
Slika 2. Prvi 3D pisac (izumio Chuck Hull 1983. godine) [11].....	3
Slika 3. Broj prodanih 3D pisaca od 2007. godine do 2019. godine[4]	4
Slika 4. 3D tisak modela slušnog aparata[10]	7
Slika 5. 3D tisak ruke prilagođene krajnjem korisniku (e-NABLE) [10]	8
Slika 6. Komora motora tiskana 3D tehnologijom [10]	9
Slika 7. Model arhitektonskog dizajna – izravni tisak sa CAD projekta[10]	10
Slika 8. Projekt bicikla izrađen pomoću 3D tiska[10]	10
Slika 9. Tehnologija izdvajanja[1].....	11
Slika 10. Tehnologija aditivne proizvodnje[1]	11
Slika 11. Dijagram ekonomije tehnologije izrade modela[1].....	12
Slika 12. Stolni CNC stroj [1]	13
Slika 13. Petoosni CNC stroj	14
Slika 14. Dijagram odabira tehnologije izrade	15
Slika 15. Procesi aditivne proizvodnje	16
Slika 16. Opis rada i dijelovi FDM tehnologije 3D tiska[9]	17
Slika 17. Opis rada i dijelovi SLA tehnologije 3D tiska[9]	18
Slika 18. Opis rada i dijelovi SLS aditivne tehnologije [9]	19
Slika 19. Opis rada i tehnologije izrade pomoću mlaznice za 3D tisak [9]	20
Slika 20. Opis rada i tehnologija izrade pomoću tehnologije vezivanja [9]	21
Slika 21. Opis rada i tehnologija izrade pomoću selektivnog taljenja [9]	22
Slika 22. Izrada potrebnog alata u svemiru uz pomoć FDM 3D tehnologije [9].....	23
Slika 23. Industrijski FDM pisac [10]	24
Slika 24. Podaci o zastarjelosti pričuvnih dijelova u tvrtkama [3].....	28
Slika 25. Mogućnost tiskanja vlastitih potreba za rezervnim dijelovima [3]	29
Slika 26. Očekivanja razvoja 3D tehnologije u različitim fazama proizvodnje[3]	29
Slika 27. Toplinska mapa utjecaja u različitim proizvodnim procesima [3]	30
Slika 28. Prepreke i 3D tehnologije u industriju izrade pričuvnih dijelova [3]	32
Slika 29. Plan za uspješno implementiranje 3D tehnologije [3]	33
Slika 30. Mlazni motor izrađen 3D tehnologijom tiska [4]	34
Slika 31. Veliki Voxeljet 3D pisac koji koristi pijesak za stvaranje modela [4]	35

Slika 32. Propeler izrađen 3D tehnologijom tiska [4]	36
Slika 33. Globalna mapa 3D hub partnera	37
Slika 34. Funkcioniranje broda uz 3D tiskanje dijelova [10]	39
Slika 35. a) pri dostavi dijelova zrakom, b) uz 3D tiskanje umjesto dostave zrakom, c) dostupnost sustava ako je pričuvni dio u brodskom skladištu [8]	41
Slika 36. Stator elektromotora.....	42
Slika 37. Podjela tehnologija prema procesima izrade	43
Slika 38. Modeliranje taložnim očvršćivanjem [10].....	44
Slika 39. Detaljan opis načina rada FDM-a [10].....	45
Slika 40. Deformacija objekta prilikom FDM izrade [10]	46
Slika 41. Prikaz slojevitog načina ispisa kod FDM tehnologije 3D tiska [10].....	47
Slika 42. Konstrukcija potpore [10]	47
Slika 43. Primjer potrebe za konstrukcijom potpore [10]	48
Slika 44. Različiti omjeri gustoće šupljina [10]	48
Slika 45. Piramida materijala termoplastike dostupne u FDM tehnologiji [10].....	49
Slika 46. Modeli tiskani FDM tehnologijom 3D tiska	52
Slika 47. Faze izrade modela aditivnom tehnologijom	53
Slika 48. Odabir tehnologije prema željenim karakteristikama	55
Slika 49. Slojeviti prikaz modela	56
Slika 50. Ultimaker Cura program	57
Slika 51. Original PRUSAi3 MK2 3D printer [10]	58
Slika 52. Original PRUSAi3 MK2 3D printer iz radionice.....	59
Slika 53. Trošak neuspjeha izrade vijka	62
Slika 54. Cilindar brave električnog ormarića.....	63
Slika 55. Cilindar brave električnog ormarića izrađen FDM tehnologijom	64
Slika 56. Univerzalni ključ električnog ormarića tiskan FDM 3D tehnologijom	66
Slika 57. Modeli izrađeni PLA (bijelo) i PETG (crno) materijalom	68
Slika 58. Model zupčanika	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci 3D tiska	6
Tablica 2. Preporučeni proces po broju izrade modela[1]	13
Tablica 3. Opis tehnologija izrade modela[1]	14
Tablica 4. Kako 3D tehnologija utječe na dobavljački lanac [3]	31
Tablica 5. Karakteristike materijala FDM tehnologije [10].....	50
Tablica 6. Sažetak FDM tehnologije [10]	50
Tablica 7. Odabir 3D tehnologije prema zahtjevu [10]	54
Tablica 8. Analiza cijene i vremena izrade modela.....	61
Tablica 9. Opis načina obrade modela 3D tiska cilindra brave el. ormarića.....	65
Tablica 10. Opis načina obrade modela 3D tiska univerzalnog ključa el. ormarića ...	67

POPIS KRATICA

3DP (engl. 3D Printing)	Trodimenzionalno tiskanje
ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)	Akrilonitil/Butadien/Stiren
AM (engl. Additive Manufacturing)	Aditivna proizvodnja, aditivni postupci
BJ (engl. Binder Jetting)	Aditivna tehnologija mlaznice materijala
CAD (engl. Computer Aided Design)	Računalom potpomognuto dizajniranje
CNC (engl. Computer Numerical Control)	Računalom upravljani stroj
DLP (engl. Digital Light Processing)	Očvršćivanje digitalno obrađenim laserskim signalom
DMD (engl. Direct Metal Deposition)	Izravno taloženje metalnog praha
DMLS (engl. Direct Metal Laser Sintering)	Izravno srašćivanje metala
DOD (engl. Drop on Demand)	Deponiranje materijala po potrebi
EBM (engl. Electron Beam Melting)	Očvršćivanje laserskim signalom
FDM (engl. Fused Deposition modeling)	Taložno očvršćivanje
FFF (engl. Fused Fabmentation Filament)	Deponiranje rastaline
LOM (engl. laminated object manufacturing)	Laminiranje
MJF (engl. Multi Jet Fusion)	Višenamjenska mlaznica materijala
PA (engl. plastic material)	Poliamid
PCB (engl. Personal Computer Board)	Tiskana pločica posebne namjene
PEEK (engl. Polyetheretherketone)	Bezbojno prirodni termoplastični polimer
PEI (engl. Polyetherimide)	Polieterimid
PETG (engl. Polyethylene terephthalate)	Plastični materijal iz porodice poliestera
PLA (engl. poly lactic acid)	Biorazgradiva plastika
PVC (engl. Polyvinyl chloride)	Sintetički polimer
SL/SLA(engl. Stereolithography)	Stereolitografija
SLM (engl. Selective laser melting)	Selektivno lasersko taljenje
SLS (engl. Selective laser sintering)	Selektivno lasersko srašćivanje
STL (engl. Standard Tessellation Language)	Triangulizacijska datoteka
TPU (engl. Thermoplastic polyurethane)	Materijal iz porodice plastike